

capítulo/Doce Ingeniería de recursos del aire

Kurtis G. Paterson
y James R. Mihelcic

En este capítulo, los lectores aprenderán sobre los constituyentes en el aire externo e interno y la magnitud de las concentraciones de dichos constituyentes. El transporte global, regional y local de los contaminantes del aire se comenta y se integra en cuanto a cómo se relaciona el transporte con la calidad del aire. La ventilación mecánica y natural en el ambiente interno se comenta en cuanto a cómo se relacionan éstas con la calidad del aire. El capítulo explica el cálculo de emisiones mediante la medición indirecta utilizando balances de masa, modelado de proceso y modelado por factor de emisión. Esto está seguido por una presentación de cuatro métodos para controlar las emisiones: tecnologías y reglamentos de control de emisiones, basado en el mercado y soluciones voluntarias. La información se proporciona en relación con los métodos para diseñar diversas tecnologías de control de emisiones para los gases: oxidación térmica, lavador por absorción de lecho empacado, biofiltro y para partículas: ciclón, lavador Venturi, colector de bolsa filtrante y precipitador electrostático.

Secciones principales

- 12.1 Introducción
- 12.2 Impactos y defensas en la salud humana
- 12.3 Transporte del aire
- 12.4 Contaminantes del aire
- 12.5 Emisiones
- 12.6 Control de emisiones del aire
- 12.7 Tecnologías de control de emisiones gaseosas
- 12.8 Tecnologías de control de emisiones de partículas

Objetivos de aprendizaje

1. Describir el medio ambiente del aire ambiental y el aire interior en un contexto de Estados Unidos y global.
2. Comentar el impacto de la contaminación del aire en el medio ambiente, la salud humana y otros costos sociales.
3. Explicar el papel que el transporte atmosférico tiene en la calidad del aire desde una perspectiva local, regional y global.
4. Enlistar los contaminantes importantes del aire medio ambiente e interior y describir las concentraciones de estos constituyentes.
5. Identificar los principales impactos medioambientales y de la salud asociados con los contaminantes clave del aire.
6. Identificar los seis criterios de contaminantes del aire, comentar su importancia en términos de impacto adverso, y entender el estatus actual en cuanto a su control.
7. Calcular las emisiones de contaminantes del aire utilizando técnicas de medición directa, medición indirecta, modelado de proceso y modelado por factor de emisión.
8. Crear estrategias efectivas para mejorar la calidad del aire que incluye soluciones regulatorias, soluciones basadas en el mercado, soluciones voluntarias y tecnologías de control de emisiones.
9. Resumir la extensión del riesgo medioambiental asociado con las mujeres y los niños expuestos a la contaminación del aire interior en el mundo en desarrollo.
10. Acceder a fuentes de información y diseñar herramientas para la ingeniería de recursos del aire.
11. Dimensionar y enlistar las principales ventajas y desventajas de los siguientes procesos para el tratamiento de la contaminación del aire: oxidación térmica, lavador por absorción de lecho empacado, biofiltro, ciclón, lavador Venturi, colector de bolsa filtrante y precipitador electrostático.

12.1 Introducción

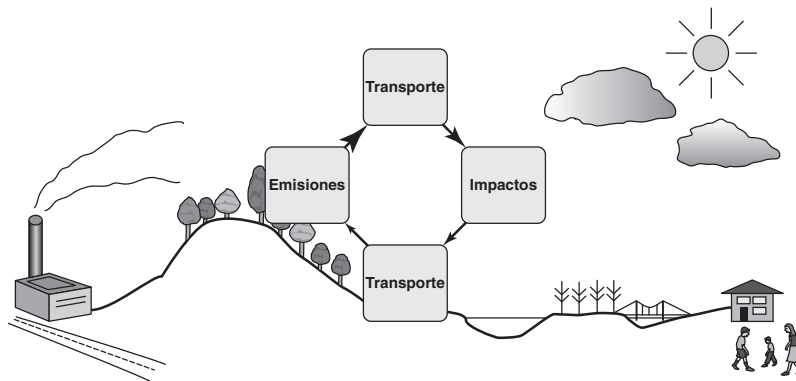
De todos los recursos naturales de la Tierra, el aire es el más compartido. El aire se mueve a través de la atmósfera conectando fuentes de contaminación a puntos de impacto, muchas veces en la lejanía. Hay otras tres características del aire que lo hacen una fuente inusualmente desafiante para lidiar con éste:

1. Por tradición, el aire no se ha visto como un recurso como el agua o los de las tierras, así es que no existen demandas públicas o privadas sobre el mismo. Así, la atmósfera se considera como un bien común, con el resultado de un abuso por parte de los emisores de contaminantes. (Recuerde el análisis en el capítulo 1 relacionado con la **Tragedia de los bienes comunes**.)
2. El aire no obedece a las fronteras geopolíticas, así es que los problemas de contaminación del aire transfronterizo son comunes y en especial difíciles de resolver.
3. El aire ambiental contaminado no se puede remediar con tecnología. Mientras que existen algunos procesos de limpieza naturales para la atmósfera, son frecuentemente insuficientes para regresar a la atmósfera las condiciones deseables dentro de marcos de tiempo razonables de interés para la sociedad y el medio ambiente. Esto da lugar a preocupaciones únicas en cuanto a las estrategias de control.

La calidad del recurso del aire en cualquier ubicación dada es una función de interacción compleja entre numerosos procesos (figura 12.1). El examen de cualquier problema particular generalmente comienza con un entendimiento del sistema y sus componentes. Los análisis adicionales pueden enfocarse en los componentes de este sistema para resolver una cuestión en particular.

12.2 Impactos y defensas en la salud humana

Los principales impactos de salud pública de la contaminación del aire incluyen tasas en aumento de mortandad, incremento de costos de cuidado de la salud, disminución de la productividad y reducción de la calidad de vida. De hecho, la disminución de productividad debido a las enfermedades relacionadas con la contaminación se estima que tiene un costo a la sociedad estadounidense de \$4.4 a \$5.4 mil millones de dólares por año (EPA, 1999). En adición, muchas enfermedades están asociadas con la contaminación del aire (tabla 12.1).



Accese a los datos de contaminación del aire en Estados Unidos

<http://www.epa.gov/air/data/geosel.html>

Figura 12.1 Principales componentes de un sistema de análisis de calidad del aire aplicados al medio ambiente Las emisiones son transportadas (y posiblemente transformadas) y resultan en impactos en la calidad del aire. Cuando se experimentan impactos significativos, se crean soluciones. El enfoque de estos mismos análisis de sistemas es efectivo para investigar las cuestiones de recursos del aire en los medios ambientales e internos.

Tabla / 12.1

Categorías generales de enfermedades humanas provocadas por contaminantes del aire

Categoría de la enfermedad	Descripción
Irritación	El quemado de bajo nivel de los tejidos de la superficie respiratoria da resultados adversos, desde dificultades en la respiración hasta falla respiratoria. El ozono es uno de los contaminantes que provoca irritación considerable.
Daño a las células	Se genera por la introducción de contaminantes en la célula. Las partículas ultrafinas contribuyen a estas enfermedades.
Alergias	Los contaminantes pueden activar una liberación de histaminas para contrarrestar el invasor, resultando en dificultades para respirar y la irritación de tejidos sensitivos (piel, ojos). Los pólenes causan estos efectos.
Fibrosis	Los contaminantes crean cicatrices permanentes en los tejidos del sistema respiratorio, resultando en un incremento de las dificultades para respirar y con frecuencia en la muerte. El asbesto es un contaminante que provoca esta enfermedad.
Oncogénesis	Los contaminantes pueden activar crecimiento de tejidos anormal y malignos que lleva al cáncer. Muchos contaminantes peligrosos del aire provocan cáncer.

El **sistema respiratorio** tiene diversas defensas en contra de la contaminación del aire, en especial de partículas grandes. Cuando una persona está respirando aire contaminado por partículas, su sistema respiratorio trabaja un poco como tamiz, de preferencia removiendo ciertas fracciones de tamaño en varias etapas como se muestra en la figura 12.2. La nariz está situada hacia abajo para que las partículas no se puedan establecer en las fosas nasales. Los vellos nasales atrapan las partículas grandes (similares a las fibras en los colectores de bolsa filtrante); el moco en la nariz, la boca y la garganta incrementa la eficiencia de eliminación de partículas más grandes (similar a una torre de lavado de gases). La piel también protege a los órganos internos de muchos contaminantes. El material particulado (PM) es una combinación no uniforme de distintos compuestos. Colectivamente, todas las partículas con diámetro de 10 μm y menos se denotan como PM_{10} . Todas las partículas con un diámetro de 2.5 μm y menos se denotan como $\text{PM}_{2.5}$.

En general, las partículas más pequeñas pueden viajar más profundamente hacia el sistema respiratorio (figura 12.2). Las partículas más grandes son atrapadas en la parte superior del sistema respiratorio produciendo una nariz tapada y una garganta irritada. Las partículas finas (con diámetros menores a 10 μm) llegan hasta los alveolos, los sacos de aire en donde se lleva a cabo el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono dentro del sistema cardiovascular. Las partículas finas se acumulan con exposición repetida, ensuciando la superficie de intercambio en los sacos alveolares, por lo que la respiración se vuelve cada vez más difícil. Es por esto que las nuevas normas de la calidad del aire, llamados indicadores $\text{PM}_{2.5}$, se crean enfocados en las concentraciones ambientales y de emisión de partículas finas.

Es menos claro qué riesgo se plantea por las partículas ultrafinas (aquéllas con diámetros menores a 0.1 μm). Se creía que estas partículas son tan pequeñas que tienen fuerza de impacto insuficiente como para dañar los sacos alveolares y son simplemente exhaladas. Ahora, las investigaciones sobre la salud sugieren que algunas de estas partículas pueden, de hecho, pasar con el aire a través de los alveolos, incorporarse en el torrente sanguíneo y afectar a muchos órganos.

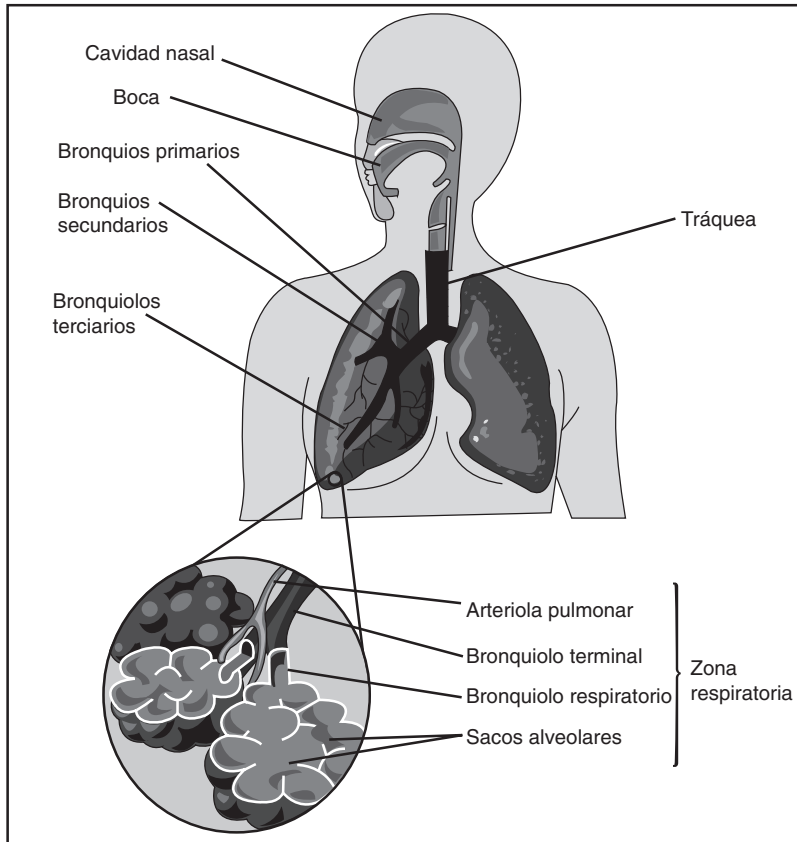


Figura 12.2 Partes principales del sistema respiratorio humano. Las principales subsecciones son nasofaríngea, traqueobronquial y pulmonar.

Una de las defensas del sistema cardiovascular es la de movilizar células sanguíneas blancas para metabolizar objetos externos. Estas partículas pueden explicar la asociación entre los ataques al corazón y las concentraciones de material particulado (PM). Al considerar todas las otras variables de riesgo, se ha observado que el PM incrementado en el aire resulta en más ataques al corazón. La conexión podría ser las partículas ultrafinas. La evidencia preliminar sugiere que dichas partículas alteran las propiedades de la sangre (por ejemplo, su viscosidad y composición) ya sea directamente o a través del proceso del metabolismo, precipitando algunas veces en insuficiencias cardiovasculares letales.

12.3 Transporte del aire

En el contexto de análisis de ingeniería de la calidad del aire, dos sistemas diferentes son de interés: el medioambiente externo (**aire ambiental**) y el medioambiente **interno**. Recuerde de la figura 12.1 que las emisiones son transportadas, lo cual puede empeorar la calidad del aire.

12.3.1 TRANSPORTE GLOBAL

La física de la atmósfera de la Tierra es tal que diversas capas distintas (o esferas) están presentes. Las dos capas más cercanas a la superficie de la

Air Pollution Training Institute

<http://www.epa.gov/air/oaqps/eog/index.html>

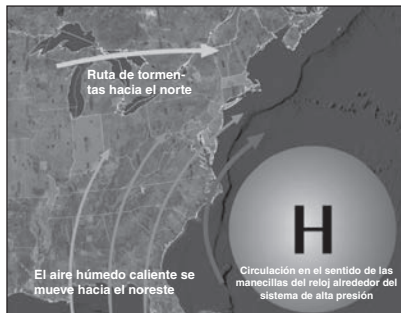
Tierra son las de interés primario para este estudio. La capa de aire más cercana a la superficie y que se extiende unos 10 a 15 km en altitud es típicamente una capa turbulenta de la atmósfera, debido al calentamiento de la superficie y los procesos de enfriamiento del alba y la puesta del sol. Esta turbulencia, o mezcla, es por lo que esta capa es referida como la **troposfera** (*tropos* es mezcla en latín). Por arriba de la troposfera (a una altitud de 15 a 50 km) está una capa con muy poca mezcla. Se le refiere como la **estratosfera** (*estratos* es capa o estratificado en latín).

La troposfera es en donde la contaminación de actividades humanas y naturales es primero emitida. Una vez que un contaminante del aire se ha colocado en la troposfera, el proceso de transporte y transformación comienza a influenciar el destino final del contaminante. La estratosfera tiene menos atmósfera encima, por lo que tiene radiación más intensa que la troposfera. La radiación, mucha de ésta ultravioleta, crea **reacciones fotoquímicas** como la conversión de oxígeno molecular (O_2) a **ozono** (O_3). Esto es por lo que existe la **capa de ozono** en la estratosfera. El ozono atrapa efectivamente el calor, por lo que la temperatura de la estratosfera se incrementa con la altitud, y esto es por lo que ocurre muy poca mezcla en la estratosfera.

12.3.2 TRANSPORTE REGIONAL

En operación a una escala regional (por ejemplo, cientos de kilómetros en tamaño) están los procesos de **transporte regional** familiares por su apariencia en los pronósticos del clima diarios: sistemas de alta y baja presión, ambos creados por la interacción de masas de aire calientes y frías cerca de la superficie.

Los **sistemas de baja presión** se crean cuando el aire que es calentado por el calentamiento de la superficie comienza a elevarse. Los **sistemas de alta presión** se crean típicamente cuando el aire está descendiendo hacia la tierra. Por lo tanto, los sistemas de presión tienen tendencias de transporte vertical únicas: hacia arriba para la presión baja y hacia abajo para la presión alta. Sin embargo, existen más fuerzas que la elevación o caída del aire. Con los cambios de presión a puntos diferentes en la atmósfera, el aire también se empieza a mover lateralmente de alta presión a baja presión. La tabla 12.2 compara las consecuencias atmosféricas resultantes (incluyendo la calidad del aire) de los sistemas de alta y baja presión en el hemisferio Norte. Advierta cómo los sistemas de baja presión pueden resultar en la calidad mejorada del aire por la dispersión y limpieza aumentadas en la precipitación.



Bermuda High

12.3.3 TRANSPORTE LOCAL

Gran parte de la población humana reside a lo largo de las costas. De hecho, 21 de las 33 megaciudades del mundo están ubicadas en las áreas costeras, y la densidad promedio de población en las áreas costeras es el doble del promedio global. Las ubicaciones costeras son propensas a patrones adicionales de transporte creados por la **interfaz tierra-mar** y las diferencias de temperatura resultantes que se desarrollan debido al calentamiento diferencial que ocurre. Esto resulta en brisas de mar-tierra (figura 12.3). Por la mañana, la tierra se calienta más rápido que el agua. El aire sobre la tierra subsecuentemente se calienta más rápido y se eleva a través de convección (muy parecido a como se eleva un globo de aire caliente). A medida que el aire se eleva sobre la tierra, el aire se mueve sobre el agua para

Tabla / 12.2

Consecuencias atmosféricas de los sistemas de alta y baja presión en el hemisferio Norte		
Consecuencia	Baja presión	Alta presión
Movimiento lateral del aire	Hacia adentro	Hacia fuera
Movimiento rotacional del aire	Contrario a las manecillas del reloj	En el sentido de las manecillas del reloj
Movimiento vertical del aire	Hacia arriba	Hacia abajo
Condiciones típicas del clima	Ventoso, nublado, precipitaciones, tormentas	Calma, cielos claros
Calidad del aire	Mejora debido a la dispersión y limpieza aumentadas	Empeora debido al estancamiento y la luz del sol

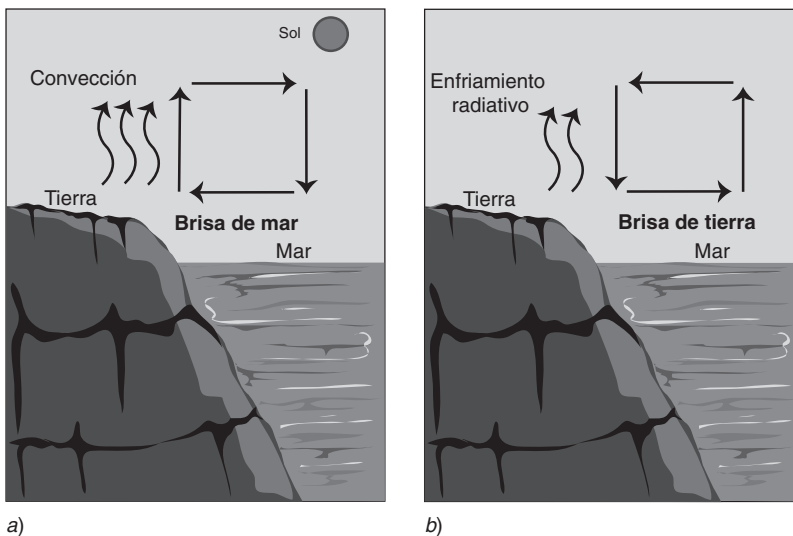


Figura 12.3 Impacto de la interfaz tierra-mar en la temperatura a) En la mañana, el sol calienta la superficie de la tierra más rápido y resulta en una brisa de mar, el movimiento del aire del mar hacia la tierra. b) En la tarde, la tierra se enfría más rápido y resulta en el movimiento del aire de la superficie de la tierra hacia el mar, la brisa de tierra. Los contaminantes del aire serán llevados junto con estos vientos.

reemplazarlo. Este movimiento del aire es referido como brisa de mar, un viento persistente del océano o lagos extremadamente grandes, hacia la tierra.

Como se muestra en la figura 12.3, estos movimientos crean una celda de circulación durante la mañana. En el final de la tarde y temprano por la noche, el sol es menos intenso, y debido a menos calentamiento radiativo, la superficie se comienza a enfriar. La tierra se enfría más rápido enfriando el aire sobre ésta más rápido. El aire más frío se vuelve más denso y desciende hacia la superficie. Finalmente, una celda de circulación opuesta a la de la mañana resulta, con una brisa persistente conocida como brisa de tierra, soplando de la tierra hacia el océano.

Estos patrones de circulación pueden influenciar fuertemente la calidad del aire durante el curso de un día, en particular en los medioambientes costeros urbanos. En la mañana, el aire relativamente limpio es transportado

del mar hacia la tierra, pero éste es rápidamente contaminado por las actividades humanas. Las concentraciones de los contaminantes pueden construirse a medida que el aire se mueve lentamente hacia el interior. En la tarde, las emisiones sobre una ciudad pueden ser enviadas hacia el mar reduciendo la contaminación del aire urbano pero con impactos potenciales sobre el ecosistema acuático. Dentro de una ciudad, este patrón diurno de brisa de mar y de tierra asegura que los lados opuestos de la ciudad tomen turnos en la dirección del viento a lo largo del día. Sin embargo, si las emisiones se concentran en una parte particular del día, entonces la gente que se encuentra en la dirección del viento durante ese tiempo puede estar expuesta a una cantidad injusta de contaminantes.



Estabilidad meteorológica y atmosférica

12.3.4 ESTABILIDAD DEL AIRE

El movimiento vertical del aire está fuertemente influenciado por la estabilidad de la atmósfera y se puede evaluar al medir el perfil de la temperatura vertical de la atmósfera. La tasa de cambio de temperatura con la altitud es referido como la **tasa de lapso**, Γ . Típicamente, la temperatura baja con la altitud. (Un promedio troposférico de $-6.5^\circ \text{C}/\text{km}$.)

La tasa de lapso atmosférico siempre está cambiando. La hora del día (calentamiento solar), las características topográficas y los climas de más

Recuadro/12.1 Relación entre la forma de una nube de humo con la estabilidad atmosférica

Un indicador clásico de la estabilidad actual de la atmósfera es el comportamiento de las nubes de humo contaminantes que emanan de las chimeneas. Las formas

características de estas nubes son sugerentes del estado de la atmósfera. Unos cuantos perfiles se proporcionan en la figura 12.4.

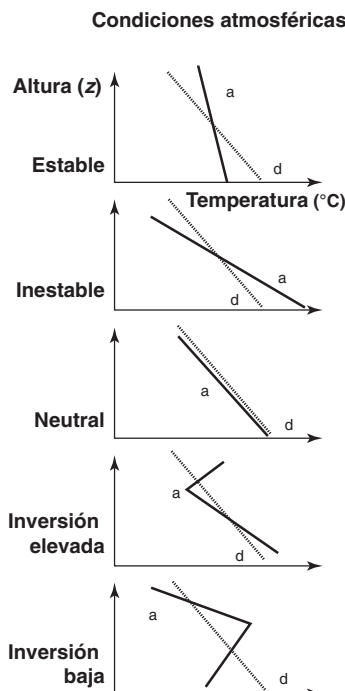
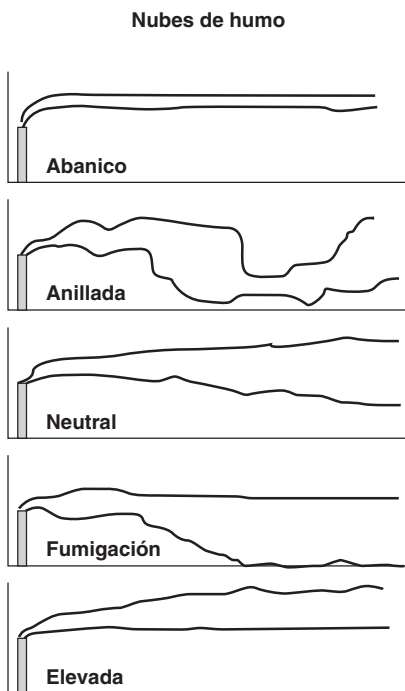


Figura 12.4 Representaciones de nubes para varias condiciones atmosféricas
 Los nombres de las nubes y las condiciones de estabilidad atmosférica se encuentran en el centro para cada situación. La tasa de lapso atmosférico medido (Γ_a) se muestra junto con la tasa de lapso estándar (Γ_d).

Tabla / 12.3

Condiciones generales de estabilidad encontradas en la atmósfera

Condición de estabilidad	Descripción
Estable	Esta situación existe cuando la temperatura atmosférica cambia más dramáticamente con la altitud que la temperatura de la parcela de aire que contiene el(los) contaminante(s). El resultado de esta supresión de movimiento vertical es menos mezcla vertical del contaminante y por lo tanto menos dilución. Las inversiones son un ejemplo de condiciones estables.
Inestable	Esta situación existe cuando la temperatura atmosférica cambia menos dramáticamente con la altitud que la temperatura de la parcela de aire que contiene el(los) contaminante(s). Al comparar la tasa de lapso atmosférico promedio ($-6.5^{\circ} \text{C}/\text{km}$) con la tasa de lapso estándar ($-9.8^{\circ} \text{C}/\text{km}$), es aparente que la atmósfera es típicamente una condición inestable. Las condiciones inestables ayudan a la mezcla, resultando en una dispersión mejorada de contaminantes y concentraciones reducidas de contaminantes.
Neutral	La atmósfera no ejerce fuerza alguna en las emisiones de contaminantes que se mueven verticalmente. Esta situación sucede cuando los cambios de temperatura para la atmósfera y la parcela de aire que contiene el(los) contaminante(s) son casi idénticas.

grande escala producirán una tasa de lapso diferente a la del promedio troposférico. Por lo tanto, las mediciones realizadas a través de lanzamientos rutinarios de globos meteorológicos, se utilizan para revelar el estado actual del perfil de temperatura vertical para una locación dada.

La *tasa de lapso atmosférico* se denota como Γ_a y la *tasa de lapso estándar* se denota como Γ_d . La atmósfera cambia la temperatura de acuerdo con la tasa de lapso atmosférico, y las parcelas de aire que contienen emisiones de contaminantes se supone que cambien la temperatura de acuerdo con la tasa de lapso estándar. Para la tasa de lapso estándar se supone que el aire esté seco, se comporte adiabáticamente con la atmósfera que lo rodea y tenga una tasa de lapso de $-9.8^{\circ} \text{C}/\text{km}$.

Al comparar la tasa de lapso estándar con la tasa atmosférica actual, se puede evaluar la estabilidad de la atmósfera, así como el movimiento vertical de las emisiones a través de la atmósfera. La tabla 12.3 compara las tres **condiciones de estabilidad** generales para la atmósfera; **estable**, **inestable** y **neutral**.

Las **inversiones** son una categoría especial de aire fuertemente estable. Durante una inversión, el perfil de temperatura de la atmósfera (el cual típicamente reduce con la altitud) es invertido; por lo tanto, el perfil de la temperatura incrementa con la altitud. Las emisiones de contaminantes liberadas en dicha atmósfera tienen la capacidad de moverse hacia arriba debido a la gran fuerza estabilizadora de la atmósfera, así es que hay poca dilución de contaminantes. En consecuencia, existen las peores calidades de aire cuando suceden las inversiones.

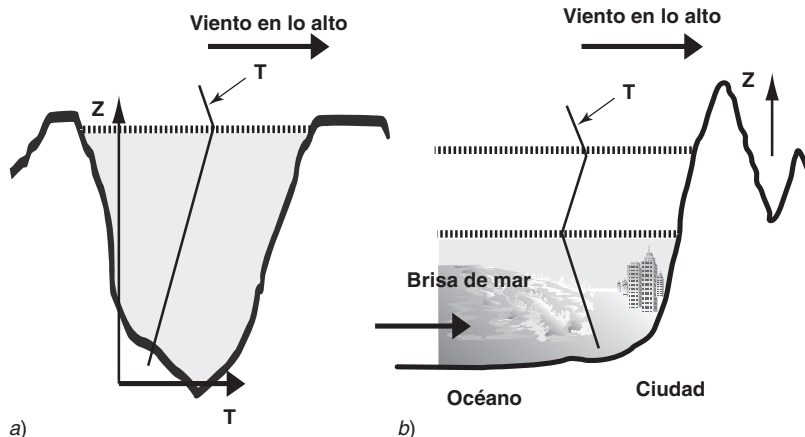
Diversos factores (principalmente geográficos) incrementan la probabilidad de las inversiones. Ubicaciones comúnmente propensas a la inversión incluyen los establecimientos costeros con colinas o montañas cercanas (por ejemplo, Los Ángeles), planicies en la dirección del viento de las montañas (por ejemplo, Denver) y valles. Como se vio antes, las locaciones costeras suelen tener grandes poblaciones humanas (y más emisiones) también. Las características topográficas como éstas pueden producir inversiones como se muestra en la figura 12.5.



**Simulador de nubes
a nivel tierra**

Figura 12.5 Inversiones producidas por características topográficas

a) Inversión de superficie en un valle y b) inversión de subsidencia en un establecimiento costero con montañas cercanas. La línea vertical muestra cómo la temperatura (T) varía con la altura arriba de la superficie (z). La inversión se reconoce por la porción del trazo con una pendiente positiva. Dentro y debajo de la inversión, las emisiones de contaminantes no se mezclan en dirección vertical, por lo que los contaminantes se crean hasta que la inversión se rompe. Los vientos de altitud superior pueden entonces transportar los contaminantes a otro lugar.



En los valles, al tiempo que llega la noche, el aire se enfría y se vuelve más denso, acumulándose en el fondo del valle. Sólo con calentamiento fuerte del sol durante el día el aire de la superficie se entibiará, comenzará a elevarse y luego separará la inversión. En estas inversiones de superficie en valles (figura 12.5) no es inusual que la inversión se extienda hasta la cima del valle. Al tiempo que la inversión se rompe, los contaminantes que están atrapados dentro de la inversión pueden ser alejados por el viento.

Las inversiones de subsidencia surgen de las masas de aire descendentes. Los sistemas de alta presión pueden crear estas condiciones mediante el movimiento hacia abajo. El aire que también se está moviendo de elevaciones altas a bajas (por ejemplo, que han pasado a través de las montañas y ahora están descendiendo hacia planicies) también pueden crear esta clase de inversión. A medida que el aire desciende, encuentra alta presión atmosférica, se comprime y se entibia, resultando en un aire tibio en lo más alto del aire de superficie más frío. Debido a estos mecanismos, la inversión de subsidencia puede encontrarse muy arriba del nivel de tierra, creando esencialmente una tope en el aire sobre un área. Las emisiones de contaminantes por debajo de la inversión también se pueden mezclar hacia, pero no a través de, la inversión.

Una diferencia crítica entre las inversiones de superficie y las inversiones de subsidencia es su persistencia. Las inversiones de superficie frecuentemente se deben al calentamiento y enfriamiento diarios. Pueden ser ocurrencias comunes para ciertas ubicaciones de valles, pero se separan con la elevación del sol y el calentamiento de superficie que le sigue. Las inversiones de subsidencia, mientras que son típicamente menos frecuentes para muchas ubicaciones, pueden ser de larga vida, permitiendo que la calidad del aire empeore durante varios días. La combinación de factores de influencia resulta en oportunidades de sitios específicos para la ocurrencia de inversiones.

12.3.5 AIRE DE INTERIORES

Desde una perspectiva de exposición, el medio ambiente interno es un contribuyente significativo potencial para un riesgo medioambiental. Este es un conductor crítico en cuanto al movimiento de diseño de **construcción verde**. Como un medio ambiente de ingeniería, el establecimiento de interiores influencia el movimiento de contaminantes y su destino de una

manera muy diferente a los procesos atmosféricos antes descritos. El movimiento del aire en un medio ambiente de interiores se logra a través del diseño (características o defectos) de los sistemas de ventilación. Debido a la naturaleza controlada de los sistemas de ventilación, el aire de interiores, a diferencia del aire ambiental, puede ser condicionado a temperatura específica, humedad y niveles de contaminantes, si se desea.

Los sistemas naturales se capitalizan en las diferencias de temperatura naturales interiores/exteriores y el viento para crear ventilación. Los sistemas de **ventilación natural** son mejor utilizados en los climas templados o moderados con demandas mínimas de calentamiento o enfriamiento. También son mejor utilizados en ubicaciones con contaminación mínima, ya que es difícil de integrar sistemas de control de contaminación con la ventilación pasiva. Los sistemas de ventilación natural capitalizan en las presiones generadas por viento y térmicamente. El diseño de tales sistemas se enfoca en canalizar tres fuerzas primariamente a través del diseño inteligente de aperturas, geometría de edificación y materiales. Obviamente, estos tipos de sistemas son más sustentables debido a que no requieren energía para mover el aire, y tampoco requieren de los muchos recursos naturales que entran hacia los sistemas de ventilación mecánica (como los metales en los ductos).

La presión del viento es creada cuando el aire golpea un edificio, impartiendo una presión positiva de cara al viento y una presión negativa en las otras caras. Esto provoca que el aire entre en las aberturas y se mueva a través del edificio de la región de alta presión a la región de baja presión como se ilustra en la figura 12.6.

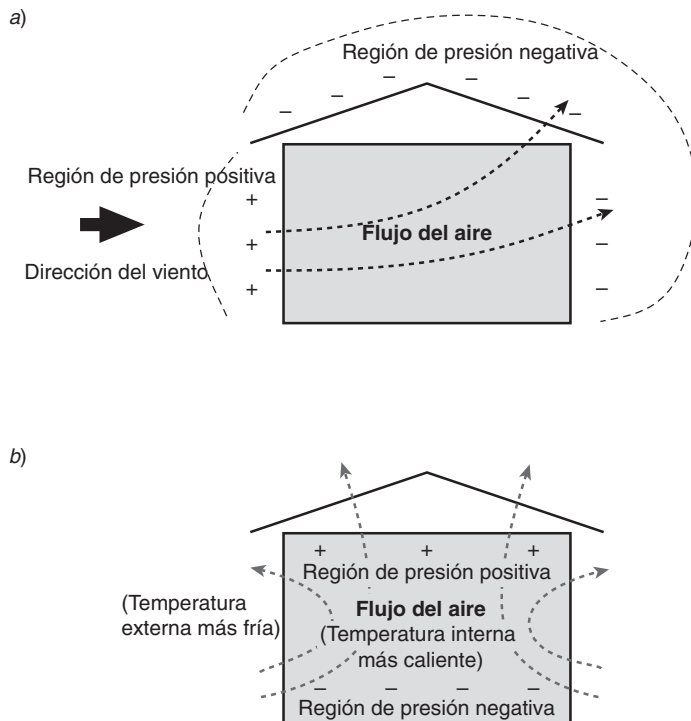


Figura 12.6 Mecanismos de ventilación natural Estos mecanismos pueden ser a) flujo de aire guiado por el viento o b) flujo de aire guiado térmicamente. El patrón de flujo para el aire guiado térmicamente sucede cuando las temperaturas externas son más frías que las temperaturas internas. En condiciones reales es probable que pasen los efectos del viento y los térmicos. En general, la ventilación guiada por el viento no se vuelve importante hasta que la velocidad del viento excede los 5 m/s. Por debajo de esta velocidad del viento, la ventilación térmica domina. En el capítulo 14, la figura 14.13 proporciona ejemplos de ventilación pasiva que se puede utilizar para eliminar o minimizar la necesidad de calentamiento y enfriamiento mecánico.

Hogares saludables

<http://www.epa.gov/region1/healthyhomes/>

La presión térmica resulta de la diferencia entre las temperaturas del aire interiores y exteriores. Las diferencias de temperatura crean una diferencia de densidad, con un aire de densidad más baja (más caliente) saliendo y creando un efecto apilado a través del edificio. Cuando el aire más caliente está en el edificio, delinea aire más frío a través de aberturas en la parte más baja del edificio al tiempo que sale a través de aberturas más altas. El movimiento del aire es invertido cuando el aire más caliente está afuera de la estructura.

En los edificios más grandes (comerciales, industriales y multiunidades residenciales) y muchas residencias, el flujo del aire es controlado a través de sistemas de ventilación mecánicos. Tales sistemas no sólo proporcionan ventilación controlada a la mayoría de los espacios dentro de la estructura, sino que con frecuencia se emparejan con los subsistemas de enfriamiento, calentamiento y de control de contaminantes del aire. Colectivamente, estos sistemas son referidos como HVAC (calentamiento, ventilación, aire acondicionado). Muchos sistemas modernos incluyen intercambios de calor que transfieren la energía en aire expelido a aire de aspiración, minimizando así los costos de enfriamiento y calentamiento. Los sistemas de ventilación naturales siempre son preferidos en términos de minimizar la cantidad de energía y los materiales que entran a una construcción durante su ciclo de vida.

ejemplo/12.1 Limpieza del humo de la cocina con ventilación natural

Más de la mitad de la población mundial confía en los combustibles sólidos para su uso en el hogar. Estos combustibles y los métodos utilizados resultan en condiciones de humo extremas. Las mujeres y los niños jóvenes que acompañan a sus madres están bajo mayor riesgo por esta exposición. Este tipo de contaminación de aire de interiores es responsable anualmente de 1.6 millones de muertes, una cada 20 segundos (Banco Mundial, 2007b).

Se le pide que investigue el problema de la contaminación elevada de aire interior en una comunidad indígena. La meta del proyecto es la de crear una solución cultural apropiada que minimice la exposición al humo durante el tiempo de cocinar. En esta locación es una práctica esencial cocinar con madera y carbón en un fuego abierto, en un área semicerrada de las estructuras de casa común (figura 12.7). Su mejor idea es la de mejorar la ventilación de las casas para reducir los niveles de partículas finas ($PM_{2.5}$).

Suponga que las dimensiones de la casa promedio son: 3 m \times 5 m \times 2.5 m; por lo tanto, $V = 37.5 \text{ m}^3$. Después de varios días de mediciones en las casas de la comunidad, ha reunido los siguientes datos: concentración de fondo $PM_{2.5}$, $C_a = 5 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$, concentración promedio interior de $PM_{2.5}$ durante el coccinado, $C = 700 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$, concentración interna pico de $PM_{2.5}$, $C_{\text{máx}} = 2000 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ y estimado de emisiones $PM_{2.5}$ del fuego, $E = 440 \text{ } \mu\text{g}/\text{min} = 7.33 \text{ } \mu\text{g}/\text{s}$.

También determine, después de que la estufa se quemara, el tiempo que lleva al aire interior regresar de la concentración pico a concentraciones ambientales de fondo, $\Delta t = 100 \text{ min}$. Para diseñar una mejor ventilación, querrá calcular la tasa promedio de ventilación actual para la estructura, utilizando los datos que recolectó.

ejemplo/12.1 Continuación



Figura 12.7 Fuego de tres piedras usado típicamente para cocinar en muchas partes del mundo en desarrollo

solución

El balance de masa de $PM_{2.5}$ está escrito (en palabras y símbolos) como sigue:

$$\left[\begin{array}{l} \text{tasa de cambio en} \\ \text{la masa de } PM_{2.5} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{masa de } PM_{2.5} \text{ que} \\ \text{entra a la casa} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{masa de } PM_{2.5} \text{ que} \\ \text{sale de la casa} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{tasa de decaimiento} \\ \text{de } PM_{2.5} \end{array} \right]$$

$$V \frac{dC}{dt} = QC_a + E - QC - kCV$$

Aquí, Q es la tasa de ventilación natural hacia adentro y hacia fuera de la casa y k es el coeficiente de deterioro de $PM_{2.5}$ en s^{-1} (de la revisión de literatura, $k = 1.33 \times 10^{-4} s^{-1}$).

Sin mejores datos, la tasa de cambio (dC/dt) se puede calcular utilizando el pico en los datos anteriores:

$$\begin{aligned} V \frac{dC}{dt} &= V \frac{\Delta C}{\Delta t} = 37.5 \text{ m}^3 \frac{2000 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 - 5 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3}{0 - 100 \text{ min}} \\ &= -748 \text{ } \mu\text{g}/\text{min} = -12.5 \text{ } \mu\text{g}/\text{s} \end{aligned}$$

ejemplo/12.1 Continuación

Resuelva para Q la tasa de ventilación:

$$Q = \frac{\left(kCV - E + V \frac{dC}{dt}\right)}{C_a - C}$$

Sustituya las otras mediciones

$$\begin{aligned} Q &= \frac{(1.33 \times 10^{-4}/s \times 700 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 37.5 \text{m}^3) - 7.33 \mu\text{g}/\text{s} - 12.5 \mu\text{g}/\text{s}}{5 \mu\text{g}/\text{m}^3 - 700 \mu\text{g}/\text{m}^3} \\ &= 0.02 \text{m}^3/\text{s} = 84.5 \text{m}^3/\text{hr} \end{aligned}$$

Para medir la calidad del aire en interiores, un cálculo común es el de cambios de aire por hora (ACH). Esto es simplemente el inverso del tiempo de retención:

$$\text{ACH} = \frac{Q}{V} = \frac{84.5 \text{m}^3/\text{hr}}{37.5 \text{m}^3} = 2.25 \text{ por hora}$$

Esencialmente, la ventilación purga el volumen de la casa 2.25 veces durante el transcurso de una hora. Esta es una tasa alta de ventilación, probablemente no se podría hacer ninguna alteración de diseño a la casa para mejorar la ventilación natural en forma apreciable. Se deberán usar otras estrategias para reducir la exposición al $\text{PM}_{2.5}$.



Discusión en clase

¿Qué recomendaría usted como una solución adecuada para los miembros de la comunidad del ejemplo 12.1?

¿Sugeriría un diseño de estufa más eficiente, cambios en el tipo de combustible utilizado (que costaría dinero), la instalación de una chimenea para desviar el humo hacia afuera de la casa o algún cambio conductual?

¿Piensa usted que los cambios conductuales son fáciles de implementar? Si no es así, ¿qué es lo que se requiere para efectuar un cambio positivo de comportamiento para esta situación en particular que sea cultural y económicamente adecuado?

Ley de aire limpio

<http://www.epa.gov/lawsregs/laws/caa.html>

12.4 Contaminantes del aire

12.4.1 INDICADORES DE CONTAMINACIÓN

El Gobierno federal de Estados Unidos, a través de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha identificado seis contaminantes de consideración especial: ozono, material particulado, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y plomo. Se les conoce como **indicadores de contaminación** con base en criterios referentes a efectos específicos en la salud y el medioambiente. Los indicadores de contaminación se encuentran en esta lista por dos razones principales: 1) son muy comunes, de manera que la mayoría de la gente y el medioambiente están expuestos a ellos y, 2) pueden causar un gran daño.

Para minimizar el impacto a la salud o al medioambiente, la EPA y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han fijado la *máxima concentración atmosférica recomendable* para los indicadores de contaminación. En Estados Unidos, estos límites de concentración son aprobados por el Congreso y se detallan en la Ley de aire limpio (y en las subsecuentes enmiendas). La **Ley de aire limpio (CAA)** fue aprobada en 1963 y señalaba que había suficiente evidencia científica ligando la contaminación del aire con los impactos en la salud y el medioambiente. En 1970, poco después de la formación de la EPA, las **Enmiendas a la ley de aire limpio (CAAA)** se convirtieron en ley. Las CAAA identificaron los indicadores de contaminación y fijaron los límites de concentración que no deberían ser excedidos en ninguna región, particularmente en los medioambientes urbanos. Estos límites de concentración se conocen como *estándares de calidad del aire*. Los estándares que enfocan los indicadores de contaminación son tan importantes que se les ha designado

Tabla / 12.4

Estándares de calidad del aire para indicadores de contaminación			
Indicador de contaminación	Organización Mundial de la Salud (OMS)*	Agencia de Protección Ambiental (EPA)	Junta de Recursos del Aire de California (CARB)
Ozono (O ₃)	0.05 ppm _v (promedio de 8 h)	0.075 ppm _v (promedio de 8 h)	0.07 ppm _v (promedio de 8 h)
Monóxido de carbono (CO)	9 ppm _v (promedio de 8 h) 26 ppm _v (promedio de 1 h)	9 ppm _v (promedio de 8 h) 35 ppm _v (promedio de 1 h)	9 ppm _v (promedio de 8 h) 20 ppm _v (promedio de 1 h)
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.023 ppm _v (promedio anual)	0.053 ppm _v (promedio anual)	0.030 ppm _v (promedio anual)
Dióxido de azufre (SO ₂)	0.007 ppm _v (24 hr average)	0.14 ppm _v (24 hr average)	0.04 ppm _v (24 hr average)
Plomo (Pb)	0.5 µg/m ³ (promedio anual)	1.5 µg/m ³ (promedio trimestral)	1.5 µg/m ³ (promedio mensual)
Material particulado respirable (PM ₁₀)	50 µg/m ³ (promedio de 24 h)	150 µg/m ³ (promedio de 24 h)	50 µg/m ³ (promedio de 24 h)
Material particulado fino (PM _{2.5})	25 µg/m ³ (promedio de 24 h) 10 µg/m ³ (promedio anual)	35 µg/m ³ (promedio de 24 h) 15 µg/m ³ (promedio anual)	35 µg/m ³ (promedio de 24 h) 12 µg/m ³ (promedio anual)

*Límites recomendados.

como **Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS)** y varían con cada contaminante como se muestra en la tabla 12.4.

Los NAAQS tienen validez legal. En Estados Unidos cada estado tiene que adoptar los estándares federales, pero los estados tienen también la libertad de fijar estándares más rigurosos. Por ejemplo, California, por medio de la Junta de Recursos del Aire de California (CARB) ha establecido estándares más estrictos. Esto es en reconocimiento de la gran población de California, sus sensitivos recursos medioambientales, numerosas fuentes de contaminación y características topográficas únicas que refuerzan la formación de inversión. Los estándares de calidad del aire de CARB también son legalmente aplicables. La OMS guía a las naciones con o sin agencias regulatorias, por lo que sus lineamientos son límites recomendados. La tabla 12.5 proporciona una visión de la(s) fuente(s), preocupaciones de salud y el estado actual de los seis índices de contaminantes del aire.

No existe ningún conjunto similar de estándares aplicables para el aire interior. Sin embargo, los límites sugeridos se han promocionado por diversas organizaciones, incluyendo la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA), el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) y la Sociedad Americana de Ingenieros de Calentamiento, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE).

DIÓXIDO DE NITRÓGENO El **dióxido de nitrógeno** se produce cuando el aire (que contiene más de 78% de N₂) se utiliza para la combustión de combustibles. Las altas temperaturas (y en ocasiones presiones) que se pueden generar durante la combustión convierten al oxígeno y al nitrógeno en NO, que es entonces rápidamente transformado en NO₂. Su presencia combinada se denota como NO_x.



Distribución espacial de la calidad del aire

Tabla / 12.5

Fuente(s), preocupaciones de salud y estatus actual de los indicadores de contaminación del aire

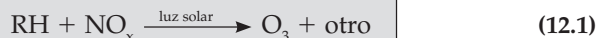
Indicador de contaminación	Fuente	Preocupación	Estatus
Óxido de nitrógeno (NO _x)	Se produce cuando el N ₂ en el aire reacciona con el O ₂ durante la combustión del combustible.	Da a la atmósfera una neblina pardusca. Puede formar pequeñas partículas que son irritantes respiratorios, produciendo así problemas respiratorios en los individuos sensibles. Ingrediente crítico en la formación de ozono. Algunos NO _x pueden reaccionar con el vapor del agua para formar ácido nítrico, creando así lluvia ácida, nieve o niebla.	La concentración promedio de nitrógeno en Estados Unidos ha disminuido en forma razonable y consistente desde 1980. La actual concentración promedio nacional es de alrededor de dos tercios del nivel de 1980, y todas las áreas urbanas ahora cumplen con los NAAQS de dióxido de nitrógeno. Sin embargo, los problemas de ozono y neblina persisten en la mayoría de las áreas urbanas.
Dióxido de azufre (SO ₂)	Se produce cuando los combustibles que contienen azufre se queman o los metales son extraídos de minerales que contienen azufre. El azufre se oxida produciendo SO ₂ . En Estados Unidos, alrededor de dos tercios de las emisiones vienen de quemar carbón para generar electricidad.	Se disuelve fácilmente en el vapor del agua, convirtiéndose en ácido sulfúrico, formando así precipitación ácida. Puede formar pequeñas partículas de sulfato que elevan la tasa de enfermedades respiratorias y muerte, en particular en niños y en la tercera edad. En adición a la neblina creada por las partículas de sulfato, el SO ₂ puede acelerar la decadencia de materiales de construcción, incluyendo esculturas y arquitectura históricas.	En Estados Unidos, la concentración promedio nacional es de alrededor de un tercio del nivel en 1980. Todas las áreas urbanas complementan los NAAQS para el SO ₂ . En ultramar, el daño por SO ₂ es extensivo en la dirección del viento de las principales instalaciones de quema de carbón. En China, la lluvia ácida ahora afecta a 25% de toda el área de tierras y a 33% de la tierra para agricultura. Encima de esto, China espera doblar su consumo de carbón hacia el 2020.
Monóxido de carbono (CO)	Producido de la combustión incompleta de combustibles. En Estados Unidos, más de la mitad de las emisiones provienen de los vehículos en marcha.	Se absorbe fácilmente hacia la sangre. A niveles bajos, la amenaza a la salud es más seria para aquellos con problemas cardiovasculares. Una simple exposición puede incapacitar a la persona y llevarla a otros problemas cardiovasculares. Mientras que los niveles altos son raramente encontrados en la atmósfera ambiental, puede ocurrir la asfixia en ambientes interiores, con frecuencia a través de una combinación de sistemas de calefacción en mal funcionamiento y una ventilación inadecuada.	La concentración promedio nacional en Estados Unidos es casi 75% más baja que en 1980. Mientras que la mayoría de las áreas urbanas están muy por debajo de los NAAQS, aún quedan algunos condados fuera del cumplimiento.
Plomo (Pb)	El plomo se añade a algunos productos. Históricamente, una fuente principal de plomo eran los vehículos de motor a gasolina con plomo añadido para mejorar el desempeño del motor. Los altos niveles de plomo	Se acumula en el cuerpo y produce impactos muy significativos en el desarrollo del cuerpo de los niños, incluso a niveles bajos. La exposición excesiva afecta el sistema nervioso, provocando ataques, retraso mental, problemas de memoria y problemas de comportamiento.	La gasolina con plomo está prohibida en Estados Unidos desde 1986. Las concentraciones promedio de plomo atmosférico en Estados Unidos son de 96% menos que en 1980, resultado directo de la reformulación de la gasolina. (Aún se encuentra disponible algo de gasolina sin plomo para uso

Tabla / 12.5

(Continuación)			
Indicador de contaminación	Fuente	Preocupación	Estatus
	atmosférico se encuentran cerca de las fundidoras, incineradores de desperdicios y fabricantes de baterías de plomo-ácido.	Los niveles bajos han mostrado incapacitar el desarrollo del cerebro en los fetos y los niños pequeños, resultando en un CI disminuido y dificultades de aprendizaje. También puede incrementar las afecciones cardíacas y la anemia. A diferencia de otros contaminantes, la mayoría de los impactos en la salud por plomo son permanentes.	limitado de vehículos todo terreno. Todavía hay dos áreas del plomo desatendidas en Estados Unidos (ubicadas en Missouri y Montana) y la gente expuesta a altos niveles de plomo todavía vive con las consecuencias de salud..
Ozono (O ₃)	Ozono (smog y ozono urbano). Se crea mediante una secuencia compleja de reacciones químicas dadas por la luz solar.	Conocido por ser un fuerte irritante respiratorio. Los individuos con sistemas respiratorios comprometidos están particularmente bajo riesgo. Esto incluye a la gente con enfermedad pulmonar, niños, adultos mayores y gente activa. Los impactos específicos son inflamación pulmonar, dificultades respiratorias, asma agravada, susceptibilidad incrementada a enfermedades respiratorias como neumonía y daño pulmonar permanente de la exposición repetida.	El ozono ha probado ser una cuestión difícil de resolver. La figura 12.8 muestra los varios cientos de condados en Estados Unidos que exceden los niveles de 8 h de NAAQS. Una gran parte del problema es la incapacidad para reducir las emisiones de los precursores del ozono (NO _x y RH) utilizando enfoques convencionales.
Material particulado fino	Las partículas no son una combinación uniforme de compuestos; algunas son ácidos, químicos orgánicos, metales o arenas. Algunas partículas son creadas a través de reacciones atmosféricas de gases como el dióxido de azufre o dióxido de nitrógeno. Colectivamente, todas las partículas con diámetros de 10 µm y menores son conocidas como PM ₁₀ . Todas las partículas con diámetros de 2.5 µm y menores son conocidas como PM _{2.5} .	Las investigaciones sobre la salud sugieren que las partículas con diámetros menores a 10 µm son problemáticas para el sistema respiratorio. Las partículas primarias pueden ser de este tamaño, pero la mayoría son grandes. La mayoría de las partículas secundarias son menores a 10 µm, muchas son mucho más pequeñas que eso.	Los NAAQS para PM ₁₀ se crearon en los años 1980. A finales de los años 1990, la EPA estableció NAAQS para PM _{2.5} . Ha habido progreso en ambos frentes. El PM ₁₀ se redujo 30% desde 1987. El PM _{2.5} se redujo 10% desde 2002. Mientras que existen áreas de no cumplimiento de PM ₁₀ , las áreas que exceden los NAAQS de PM _{2.5} están extendidas (figura 12.9). La mayoría de los abusos de PM ₁₀ se encuentran en áreas rurales y secas, mientras que la mayoría de las violaciones de PM _{2.5} se localizan en grandes áreas metropolitanas.

MONÓXIDO DE CARBONO El **monóxido de carbono** se produce por la combustión incompleta del combustible. Esto generalmente sucede debido a una cantidad insuficiente de aire para la cantidad de combustible. La causa de esta inadecuada proporción de aire-combustible puede ser un equipo mal operado o con poco mantenimiento, limitaciones en el flujo de aire o bajas temperaturas. Las fuentes principales de monóxido de carbono incluyen vehículos, plantas de energía y estufas de leña. Las fuentes naturales (como los incendios de bosques) también pueden producir emisiones importantes.

OZONO A diferencia de otros indicadores de contaminación, el ozono no proviene de ninguna fuente directa. En vez de eso, el ozono es creado por una compleja secuencia de reacciones químicas generadas por la luz del sol. El proceso general de este sistema de reacciones fotoquímicas se resume de la siguiente manera:



en donde RH es una abreviación para hidrocarburos reactivos. Los hidrocarburos reactivos son una clase de compuestos en los que se incluyen muchos productos industriales, comerciales y personales (benceno, propano, compuestos de la gasolina y otros). Algunos de estos materiales escapan a la atmósfera accidentalmente y otros pueden ser liberados en pequeñas cantidades por medio de descargas autorizadas. Como se comentó antes, los óxidos nitrosos (notablemente el NO y el NO₂) se producen al quemarse un combustible con aire. Cuando estos compuestos están presentes en el aire y el sol se eleva, se inicia una secuencia de reacciones químicas y comienza la formación del ozono.

Típicamente, la concentración de ozono va creciendo durante el día, llegando a su máximo al principiar la tarde en sincronía con el punto más alto de la fuerza de la luz solar y la temperatura del aire, pues ambos refuerzan las reacciones que producen el ozono. Después de que el sol se pone, la secuencia fotoquímica resumida en la ecuación 12.1 se detiene. Esto permite reacciones que destruyen el ozono, lo mismo que procesos físicos que retiran el ozono dominando y reduciendo las concentraciones de ozono durante el atardecer.

El transporte del ozono es un problema para receptores en la dirección del viento. A velocidades típicas del viento, es fácil para el ozono (y sus precursores) ser transportado cientos de kilómetros al día. En locaciones remotas (como parques nacionales y sobre el océano) la mayoría del ozono es transportado de sitios urbanos contra el viento. Las concentraciones de ozono en la mayoría de los centros urbanos es una combinación de ozono generado localmente más el de fuentes contra el viento. En corredores urbanos, en especial de alta densidad como la costa este de Estados Unidos, las contribuciones contra el viento son sustanciales (figura 12.8).

El ozono también tiene un efecto perjudicial en los ecosistemas. Las plantas sensibles pueden ser dañadas por el ozono, haciéndolas mucho más susceptibles a enfermedades, insectos, tensiones climáticas y competitividad. Tal daño a las plantas produce ciertas ondas a través de la cadena alimentaria de los ecosistemas. Como no todas las plantas son similarmente sensibles al ozono, tal contaminación puede reducir la biodiversidad en un ecosistema. En los sistemas agrícolas, el ozono reduce el rendimiento de la cosecha y la productividad de los bosques. El impacto estético también es evidente, ya que el ozono daña la apariencia de la vegetación en los espacios verdes urbanos, los parques nacionales y las áreas de recreación.

En la Unión Europea se calcula que la exposición al ozono causa más de 20 000 muertes prematuras al año (EEA, 2007). La incrementada necesidad de medicinas para males respiratorios (inhaladores, por ejemplo) da como resultado 30 millones de días de uso de medicamentos adicionales por año. Aunque es imposible representar por completo este costo a la sociedad, se estima que el costo de impacto en la salud es de 16.7 mil millones de dólares al año, y el daño anual a las cosechas es de 3.9 mil millones de dólares (EEA, 2007). Algunas especies son especialmente sensibles al ozono (por ejemplo, el trigo) así que estos impactos económicos no están distribuidos de forma equitativa en todo el sector agrícola.

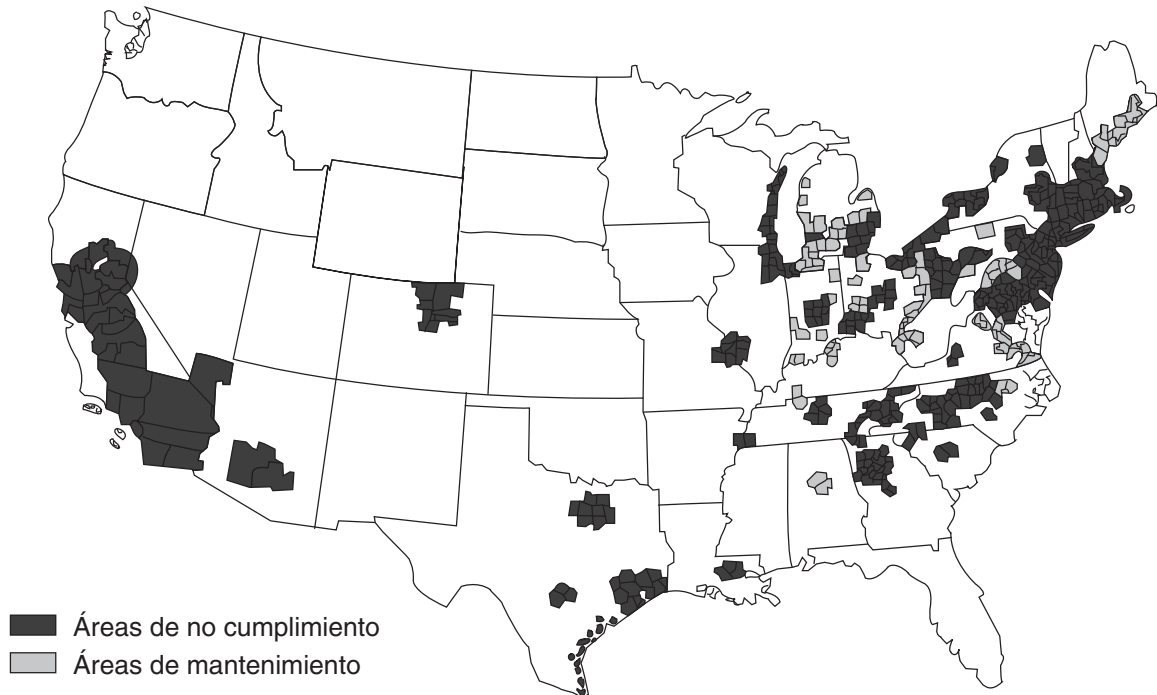


Figura 12.8 Áreas de no cumplimiento y de mantenimiento para el ozono Desde el año 2007, varios cientos de condados de Estados Unidos excedían el NAAQS de ozono de 8 h (áreas de no cumplimiento marcadas). Más de cien condados han mejorado recientemente hasta el punto en donde ya no están en un estado de no cumplimiento (llamadas áreas de mantenimiento).

De EPA (2007).

MATERIAL PARTICULADO El material particulado (PM, por sus siglas en inglés) se debe a la compleja mezcla de pequeños sólidos y líquidos aéreos. La fuente primaria de material de partículas finas es la combustión. En nuestros días, los vehículos, las plantas de energía, la industria y las prácticas agrícolas abastecen abundantes emisiones alrededor del mundo. La combustión de los combustibles (para la generación de electricidad), la transportación y los procesos industriales, cada uno abastece casi un tercio de la emisión de partículas finas.

Algunas partículas se generan directamente de una fuente y se conocen como *partículas primarias*. Las fuentes de las partículas primarias incluyen los sitios de construcción, los campos agrícolas, los caminos no pavimentados, los fuegos y las chimeneas. Estas partículas muchas veces se originan en fuerzas que muelen o desgastan los materiales sólidos convirtiéndolos en partículas tan pequeñas como para estar suspendidas en el aire. Otras partículas se forman de las reacciones en la atmósfera y se conocen como *partículas secundarias*. Las fuentes principales de estos precursores incluyen las plantas de energía, la industria y los vehículos. La figura 12.9 muestra la ubicación de los condados en Estados Unidos que exceden el estándar $PM_{2.5}$.

La tabla 12.6 proporciona las concentraciones PM_{10} en varias ciudades principales en el mundo. Recuerde que las guías de la OMS para el PM_{10} recomiendan limitarlo a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (promedio de 24 h). Esta contaminación

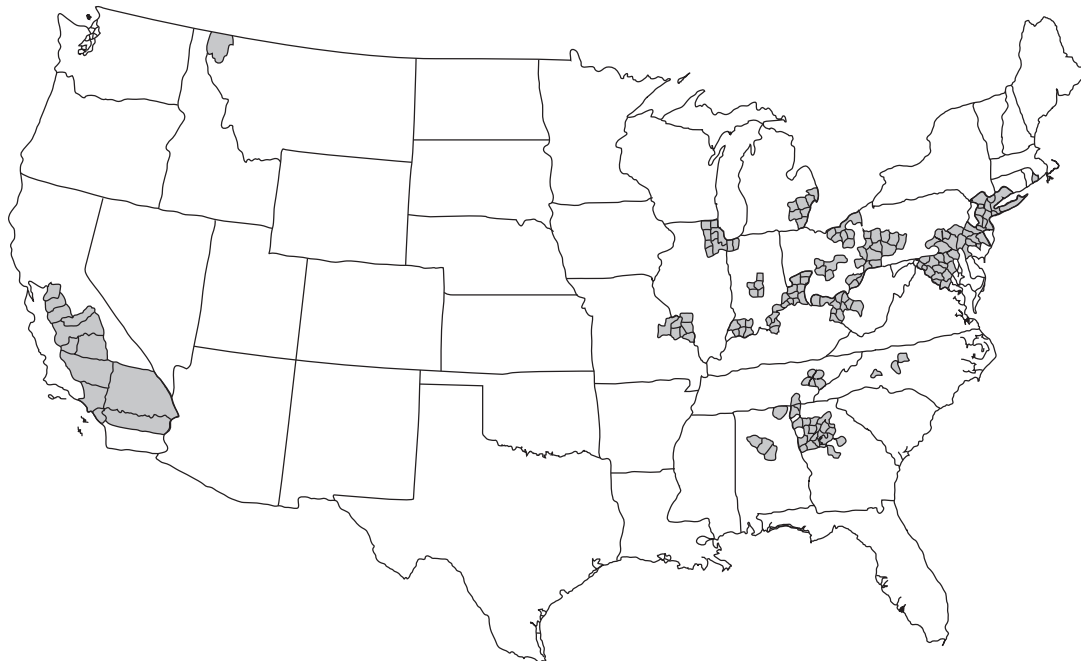


Figura 12.9 Condados de Estados Unidos que excedieron el NAAQS de $PM_{2.5}$ en 2007. A estos condados se les conoce como áreas de no cumplimiento.

De EPA (2007).

Tabla / 12.6

Concentraciones promedio anuales de material particulado en ciudades principales del mundo seleccionadas Los datos PM_{10} se presentan debido a que sólo algunos países miden rutinariamente el $PM_{2.5}$. Los lineamientos de la OMS para PM_{10} son de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (promedio de 24 h).

País	Ciudad	Población (miles)	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Brasil	Sao Paolo	18 333	40
Canadá	Toronto	5 312	22
China	Beijing	10 717	89
	Chongqing	6 363	123
	Tianjin	7 040	125
Ghana	Accra	1 981	33
India	Kolkata	14 277	128
	Madras	6 916	37
	Delhi	15 048	150
Indonesia	Jakarta	13 215	104
Irlanda	Dublin	1 037	19

Tabla / 12.6

(Continuación)

Japón	Tokio	35 197	40
Kenia	Nairobi	2 773	43
México	Ciudad de México	19 411	51
Noruega	Oslo	802	14
Filipinas	Manila	10 686	39
Tailandia	Bangkok	6 593	79
Turquía	Estambul	9 712	55
Ucrania	Kiev	2 672	35
Reino Unido	Londres	8 505	21
Estados Unidos	Chicago	8 814	25
	Los Ángeles	12 298	34

FUENTE: Banco Mundial, 2007b. Datos para 2004.

produce consecuencias negativas a la salud. Por ejemplo, un estudio reciente del Banco Mundial calcula que las consecuencias de la contaminación del aire para China son de 400 000 a 450 000 muertes prematuras cada año (Banco Mundial, 2007a). En comparación, el número de muertes asociado con las enfermedades provenientes del agua en China se estima en 66 000 al año.

DIÓXIDO DE AZUFRE azufre está presente en muchas materias primas, incluyendo petróleo, carbón, aluminio, cobre y hierro. Cuando estos combustibles se queman o estos metales se extraen del mineral, el azufre puede oxidarse produciéndose diferentes gases de óxido de azufre. El más común de éstos es el **dióxido de azufre (SO₂)**.

PLOMO Como el azufre, el **plomo** también se encuentra en forma natural en el medioambiente, pero también se añade a algunos productos. Históricamente, una fuente principal de contaminación del aire con plomo eran los vehículos de motor que quemaban gasolina a la que se le añadía plomo para mejorar el desempeño del motor. Recientemente, debido a que Estados Unidos y muchos otros países han eliminado la gasolina con plomo, el procesado de metales se ha vuelto la principal fuente de emisión de plomo. La gasolina con plomo aún se utiliza en muchas naciones en desarrollo (vea la figura 12.10), lo que es una razón principal por lo que la exposición al plomo contribuye en 11% al riesgo ambiental mundial. (Para más sobre este tema refiérase al capítulo 1.)

Contaminación por plomo en el aire

<http://epa.gov/air/lead/>

12.4.2 CONTAMINANTES PELIGROSOS DEL AIRE

Los **contaminantes peligrosos del aire (HAP)** no están amparados por los estándares de calidad del aire ambiental. Ellos tienden a no estar uniformemente presentes en la atmósfera global, regional o local. De ahí que, a diferencia de los indicadores de contaminación, estos contaminantes no están sujetos

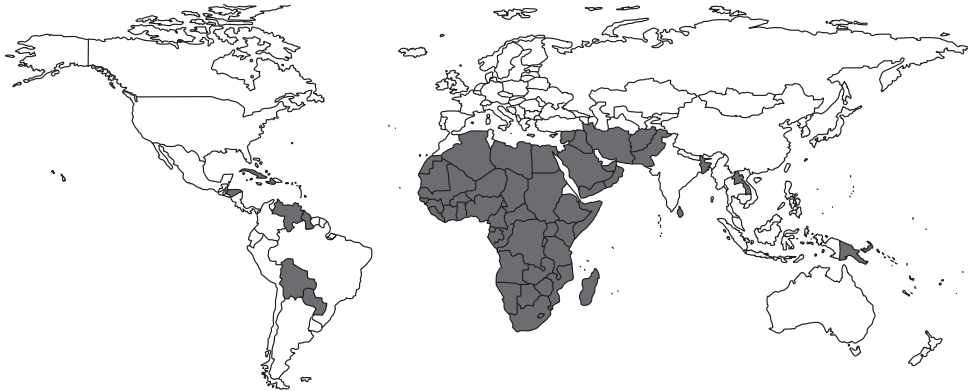


Figura 12.10 Disponibilidad de gasolina con plomo en el mundo El uso de gasolina con plomo está asociado con los altos niveles de plomo en el aire ambiental. Los países que sólo utilizan gasolina con plomo están sombreados.

Datos de la UNEP (2007).

a la rutina del monitoreo del aire ambiental. En vez de esto, las emisiones son monitoreadas en la fuente. La EPA compila una lista de HAP. Debido a su impacto potencial, los contaminantes peligrosos del aire también se conocen como *tóxicos del aire*. La EPA enlista actualmente 188 HAP que han sido enfocados para los esfuerzos de reducción de emisiones. Estos contaminantes caen en cuatro categorías: 1) pesticidas, 2) metales, 3) orgánicos y, 4) radionúclidos.

Las fuentes de HAP incluyen unas cuantas fuentes naturales, por ejemplo, los volcanes y los fuegos forestales. También, muchos HAP orgánicos están presentes en el escape de los vehículos. Las fábricas, refinerías y plantas de energía pueden liberar metales y orgánicos. Los pesticidas pueden ser empujados por el aire desde los campos agrícolas. Los radionúclidos pueden ser liberados por accidente de las plantas nucleares o intencionalmente con la detonación de armas radioactivas. Además de su emisión a la atmósfera ambiental, existe un potencial considerable para la liberación de HAP en el hogar, el lugar de trabajo y otros lugares en interiores, muchas veces debido a la mala selección de materiales de construcción o malas prácticas de mantenimiento.

La exposición a tóxicos en el aire ocurre de diferentes maneras. El respirar aire contaminado permite que los HAP lleguen a lo más profundo del cuerpo, en donde pueden pegarse a la cubierta del pulmón o ser llevados junto con el aire hasta el torrente sanguíneo. La comida se puede contaminar con los tóxicos del aire que caen en el producto o por la contaminación del alimento que consume el ganado. Los tóxicos del aire pueden agregarse a material particulado que gradualmente se retiran de la atmósfera vía precipitación o asentamiento gravitacional. Algunos de estos materiales caen dentro de cuerpos de agua, introduciendo los tóxicos a los ecosistemas de agua. Algunos tóxicos del aire se asientan en el suelo contaminando la tierra. La gente ingiere tierra por accidente (polvo en la boca, por ejemplo) o en forma intencional (tierra en la mano sucia de un niño) creando otro medio de entrada.

La mayoría de las reducciones de HAP se han logrado al sustituir los materiales peligrosos por productos o materias químicas verdes en la fabricación o uso de productos. Estas prácticas también se están adoptando en el hogar. Tales esfuerzos son necesarios si la exposición general a los tóxicos del aire ha de ser apreciablemente reducida.

¿En dónde están altos los HAP?

<http://www.scorecard.org/env-releases/hap/>

Tabla / 12.7

Contaminantes comunes, fuentes y límites de exposición permitidos del aire interior			
Contaminante	Fuente	Límite de exposición permitido (PEL)	Límite de exposición a corto plazo (STEL)
Monóxido de carbono	Estufas, hornos	50 ppm _v	400 ppm _v
Formaldehído	Tapetes, madera aglomerada, madera contrachapada, terminados, subsuelo, páneles, muebles	0.75 ppm _v	2 ppm _v
Material particulado	Procesamiento de materiales, cocción de alimentos, tapetes	5 mg/m ³	
Compuestos orgánicos volátiles (VOC)	Solventes, artículos para limpieza, pinturas, muebles para el hogar, productos de cuidado personal	Específico del compuesto	
Radón	Difusión de radio hacia la tierra	100 pCi/L*	
Ozono	Fotocopiadoras, impresoras, dispositivos de extracción de aire	0.1 ppm _v	0.3 ppm _v
Agentes biológicos	Moho, hongos, mascotas	N/A	
Humo de tabaco ambiental (ETS)	Cigarros, puros, pipas	N/A	
Asbestos	Sistema de calefacción e aislamiento acústico, tejas de suelos y techos, ignifugación estructural	0.1 fibra/cm ³	

*Máxima concentración permisible, no PEL.
FUENTE: Límites de exposición de OSHA.

12.4.3 CONTAMINANTES DEL AIRE INTERIOR

La contaminación del aire interior difiere de la contaminación del ambiente en varios puntos. Primero, las fuentes son diferentes. También, los contaminantes pueden permanecer más tiempo en el aire debido a las tasas de ventilación limitadas. Una tercera variante es que, a diferencia de la contaminación del ambiente, la calidad del aire interior es raramente monitoreada. Finalmente, existe ejecución limitada de la calidad del aire en la mayoría de los lugares interiores.

El ambiente interior puede poseer cualquier contaminante del aire reglamentado o peligroso. La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) ha establecido **límites de exposición permisibles (PEL)** para algunos contaminantes en el interior del lugar de trabajo (tabla 12.7). La exposición de los trabajadores no puede exceder estos niveles, ya que OSHA tiene la facultad de advertir, citar y multar a las compañías que infrinjan. La Ley OSHA requirió que OSHA estableciera estos estándares para proteger a los trabajadores y ayudar a los negocios a proporcionar ambientes de trabajo más seguros. Los PEL se acuerdan a través de negociaciones con la industria, por lo que el progreso ha sido lento desde 1973. Hasta que se puedan establecer más PEL, OSHA proporciona lineamientos sobre otros contaminantes a través de los *valores de límite de umbral (TLV)*.

Los PEL y los TLV se establecen a una concentración que no deberá ser excedida por una exposición de concentración promedio ponderada en el tiempo (TWA) durante el curso de un día de trabajo de 8 h. La siguiente ecuación expresa esta TWA:

$$TWA = \frac{\sum_i C_i t_i}{\sum_i t_i} \quad (12.2)$$

en donde t_i es el periodo durante el cual una muestra de aire se toma para análisis, y C_i es la concentración promedio del contaminante durante el periodo de muestra.

Ya que los trabajadores pueden cambiar los ambientes o las fuentes pueden cambiar las emisiones, la TWA es un simple cálculo que estima el nivel de exposición promedio durante el curso de un día. Para proteger a los trabajadores de compuestos especialmente peligrosos, algunos contaminantes también tienen límites de exposición a corto plazo (STEL), los cuales son TWA para una exposición de 15 minutos. Sin importar si existe un STEL, generalmente se recomienda que las exposiciones a corto plazo nunca excedan tres veces la TWA.

Si un PEL o TLV lo excede, OSHA puede forzar al empleador a tomar diversos pasos, incluyendo el monitoreo de la salud del empleado, muestras de aire y medidas de control. Cada uno de los PEL incluye recomendaciones para los procedimientos de muestras de aire, guardar registros, métodos de control y etiquetamiento de áreas de trabajo.

ejemplo/12.2 Exposición de concentración promedio ponderada en el tiempo (TWA)

Una trabajadora está expuesta a un químico durante el curso de su jornada de 8 h según se muestra en la figura 12.11. El PEL para este químico es de 6 ppm_v. Calcule la TWA y verifique las violaciones a la seguridad.

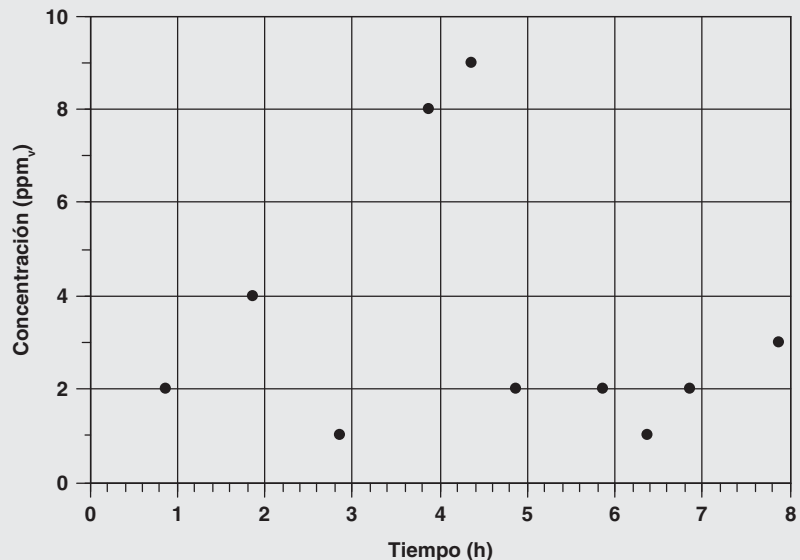


Figura 12.11 Exposición al químico durante la jornada de 8 h utilizada en el ejemplo 12.2

ejemplo/12.2 Continuación

solución

Al utilizar los datos proporcionados y la ecuación 12.2, la TWA puede determinarse como sigue:

$$\begin{aligned} \text{TWA} &= \frac{\left((2 \text{ ppm} \times 60 \text{ min}) + (4 \text{ ppm} \times 60 \text{ min}) + (1 \text{ ppm} \times 60 \text{ min}) + (8 \text{ ppm} \times 60 \text{ min}) \right. \\ &\quad \left. + (9 \text{ ppm} \times 30 \text{ min}) + (2 \text{ ppm} \times 30 \text{ min}) + (2 \text{ ppm} \times 60 \text{ min}) + (1 \text{ ppm} \times 30 \text{ min}) \right. \\ &\quad \left. + (2 \text{ ppm} \times 30 \text{ min}) + (3 \text{ ppm} \times 60 \text{ min}) \right)}{(60 + 60 + 60 + 60 + 30 + 30 + 60 + 30 + 30 + 60 \text{ min})} \\ &= 3.4 \text{ ppm}_v \end{aligned}$$

La TWA de 3.4 ppm_v está por debajo del PEL dado de 6 ppm_v.

Las mejores prácticas sugieren que la exposición a corto plazo debe ser menor a 3 × TWA. La concentración más alta observada en nuestro estudio fue de 9 ppm_v, la cual es menor a 3 × 3.4 = 10.2 ppm_v. Por lo tanto, el ambiente de trabajo cumple con los lineamientos. Sin embargo, el uso de un proceso de manufactura verde eliminaría la necesidad (y el costo) de monitoreo costoso del lugar de trabajo y la responsabilidad potencial de la exposición en el lugar de trabajo.

12.5 Emisiones

Las **emisiones** son la cantidad de contaminante que una fuente pone en el aire, usualmente durante una cantidad fija de tiempo; por lo tanto, las tasas de emisión se expresan como masa por tiempo. Las unidades de tasa de emisión típicas dependen de la fuente, el contaminante y el problema de interés, pero las unidades comunes son g/s, kg/día y toneladas/año. En algunos lugares, toneladas/día y lb/h puede que aún se utilicen.

Las tasas de emisión pueden ser altamente variables. Las emisiones de la misma fuente pueden variar con el tiempo, y las emisiones de fuentes similares pueden ser muy diferentes. También, la composición de los contaminantes en la emisión del aire puede cambiar dramáticamente con las condiciones de operación.

12.5.1 CLASIFICACIÓN DE EMISIONES

La tabla 12.8 revisa los muchos métodos disponibles para clasificar las emisiones del aire: 1) por contaminante específico, 2) por tipo de fuente y, 3) tipo de liberación *a*) por procesos naturales, *b*) como emisiones permitidas, *c*) como emisiones fugitivas y, *d*) como emisiones accidentales.

Clasificadas por tipo de fuente, las emisiones pueden venir de *fuentes estacionarias*, *fuentes puntuales* y *fuentes móviles*. Para propósitos de contabilización, estas emisiones se miden en la región más pequeña posible y luego se totalizan según lo necesiten los estados. La figura 12.12 muestra un ejemplo de una presentación a nivel condado de las densidades de emisiones de VOC (emisiones anuales divididas entre el área del condado) para diversos estados del este. Tal establecimiento de datos ayuda a comunicar los patrones de emisión y pueden ofrecer un mejor ingreso en los modelos de computadoras de calidad del aire.

Calidad del aire en su vecindario

<http://www.scorecard.org>

Tabla / 12.8

Clasificación de emisiones de aire

Maneras de clasificar las emisiones	Explicación
Contaminante específico	<p>Los impactos son generalmente específicos para un contaminante en particular, como lo son las estrategias de reducción de emisiones. Los indicadores de contaminación reciben la mayoría de la atención. Una lista común incluiría dióxido de azufre (SO_2), óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), material particulado ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}), amonía (NH_3) y compuestos orgánicos volátiles (VOC).</p> <p>El amonía y los VOC no son indicadores de contaminación pero se incluyen porque son precursores importantes para la formación de indicadores de contaminación, partículas finas en el amonía y ozono en los VOC.</p>
Tipo de fuente	<p>Una clasificación crítica es si la fuente es estacionaria o móvil. Las <i>fuentes estacionarias</i> están fijadas a una ubicación específica. Las fuentes estacionarias son generalmente identificadas como fuentes puntuales o de área.</p> <p>Las <i>fuentes puntuales</i> son grandes, frecuentemente con las emisiones entrando a la atmósfera desde una pila (por ejemplo, plantas generadoras a carbón). Las <i>fuentes de área</i> son con frecuencia muchas fuentes pequeñas similares que son mejor direccionadas colectivamente, en vez de individualmente (por ejemplo, estaciones de gas que emiten VOC durante el almacenamiento y el abastecimiento). Individualmente, cada estación de gas tiene una pequeña cantidad de emisiones, y sería un reto el medir cada una a través de una ciudad. En su lugar, los valores promedio de emisión pueden usarse para cada estación y multiplicarse por el número de estaciones en la región para llegar a una contribución total. Una fuente de área puede ser también un proceso que emite sobre una región más grande (por ejemplo, emisiones de partículas sopladadas por el aire desde un sitio de construcción o desde un campo agrícola).</p> <p>Las <i>fuentes móviles</i> están subdivididas en fuentes móviles en carreteras y fuentes móviles no en carreteras. Los principales contribuyentes a las emisiones de fuentes móviles en carreteras son los automóviles y los camiones. Las fuentes móviles no en carreteras incluyen barcos, aviones, equipos de construcción, trenes y vehículos recreativos.</p>
Procesos naturales	<p>En algunas áreas, las emisiones naturales pueden dominar el total de ciertos contaminantes, y en estos casos, habrá muy poco impacto de las estrategias de ingeniería de control de emisiones. El identificar tales regiones se hace solo a través de una auditoría cuidadosa de emisiones.</p> <p>Una fuente natural principal es la emisión de VOC por ciertos árboles. Las Montañas Smoky en el sureste de Estados Unidos se llaman así debido a la neblina natural generada de las emisiones de VOC del bosque. Mientras que esta región está grandemente influenciada por emisiones antropogénicas transportadas de las áreas urbanas, los VOC naturales son persistentes y contribuyen sustancialmente. El resolver los problemas del ozono en el área entonces se vuelve aún un mayor reto debido a esta fuente natural de emisiones de VOC y crecimiento rápido de población que se concentra en las comunidades orientadas a vehículos.</p>
Emisiones permitidas	<p>Otro esquema de clasificación de emisiones importante, en particular para la industria, es si una emisión es permitida, fugitiva o accidental. Las emisiones permitidas son aquellas otorgadas por un acuerdo con la agencia regulatoria estatal del recurso del aire. Basados en el proceso o actividad propuesta por la compañía, el estado permitirá una cierta cantidad de emisiones para ser liberadas en la atmósfera, siendo determinada la cantidad de tal manera que no resultará en la degradación del medioambiente. Las emisiones que verá venir de una pila son liberaciones permitidas, asumiendo que la compañía se está apegando al rango de emisiones prescrito por la autorización del estado.</p>
Emisiones fugitivas	<p>Las liberaciones de contaminantes de una fuente ilimitada. Estas fuentes son con frecuencia fuentes de área y exteriores. Equipo pesado de construcción moviendo el polvo en un camino sin pavimentar, operaciones de movimiento de tierra, o esparcimiento de pesticida en zonas agrícolas son todos ejemplos de actividades que crean emisiones fugitivas. Éstas son</p>

Tabla / 12.8

(Continuación)

especialmente difíciles de controlar. En general, deben rediseñarse las prácticas para resolver dichos problemas.

La vasta mayoría de emisiones fugitivas son liberaciones de materias de partículas de grandes fuentes abiertas; operaciones de movimiento de tierra, transportación y almacenamiento son culpables comunes. Los controles de emisiones fugitivas de estas actividades requieren de cambios en el diseño y operación, creando con frecuencia formas para minimizar las fuerzas que liberan el material hacia la atmósfera, agitación notablemente guiada por el viento y mecánica. Las barreras de viento (por ejemplo, caminos vegetativos y franjas) y control de humedad (por ejemplo, programas de humedecimiento de superficie rutinarios) son dos estrategias de ingeniería generales para controlar estas emisiones.

Emisiones accidentales

Liberaciones accidentales o la mala operación y mantenimiento del equipo. La mayoría de estas emisiones son mejor controladas por el mantenimiento diligente del equipo, incluyendo ductos, válvulas y depósitos de almacenaje. Los esfuerzos de ingeniería en esta área no sólo reducen los impactos en la calidad del aire, sino que para muchas industrias, ofrecen ganancias financieras debido a la eliminación de ineficiencias. Para algunos factores de calidad del aire, las liberaciones fugitivas y accidentales pueden ser un rival para las liberaciones permitidas. Aunque debido a la naturaleza de su liberación, es mucho más difícil cuantificar estas emisiones.

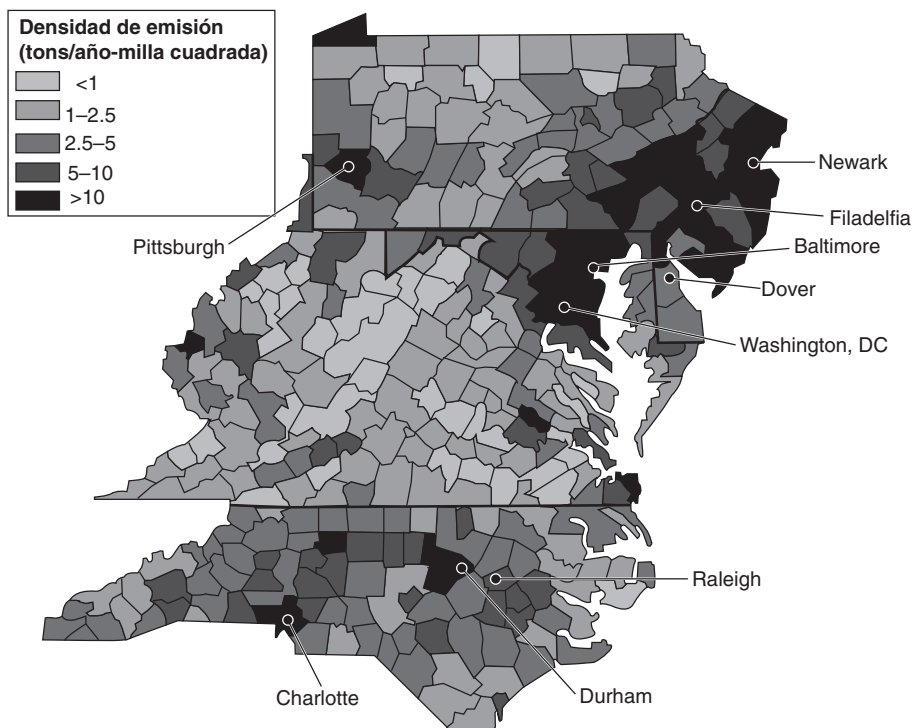


Figura 12.12 Densidades anuales promedio de emisión de VOC (excluyendo emisiones biogénicas) a nivel condado en diversos estados del este, 2002 Para propósitos de contabilización, las emisiones se calculan en la región más pequeña posible, y luego se hace un total según la necesidad de los estados.

De MARAMA (2005). Figura preparada bajo la dirección de doctor Serpil Kayin (MARAMA), utilizando datos obtenidos del estado miembro de MARAMA y agencias locales. El doctor Jeffrey W. Stehr de la Universidad de Maryland en el College Park fue el autor principal del reporte.

Recuadro / 12.2 Darle sentido a las emisiones de aire en la región del Atlántico Central

Las fuentes estacionarias y móviles requieren estrategias de control muy diferentes. De forma adicional, algunas cuestiones de calidad del aire son de tan gran escala que solo una estrategia regional mejorará efectivamente la situación. Junto con la costa este de Estados Unidos, los estados en el corredor fuertemente urbanizado con frecuencia trabajan juntos para mejorar los factores de calidad del aire. Es importante entender qué tanto de un contaminante se origina de cada tipo de fuente, como se hizo en esta gráfica de emisiones totales del 2002 mostrada en la figura 12.13 para los contaminantes importantes en los estados del Atlántico Central.

Después de más investigación de emisiones de SO_2 , la figura 12.13 sugiere que la mayoría de las emisiones SO_2 se originaron de fuentes estacionarias de punto (en Estados Unidos, dos tercios de las emisiones de SO_2 se originan de la combustión de carbón para generar electricidad). La variabilidad regional podría también ser evaluada para determinar si las soluciones de control de emisiones se deberían aplicar uniforme o selectivamente (vea la figura 12.14).



Discusión en clase

Advierta como cada uno de los indicadores de contaminación (o el precursor de amonio) tiene una distinta mezcla de contribuciones de fuente. El entendimiento de cada mezcla es el comienzo para el diseño de estrategias de mitigación efectivas. ¿Cómo podrían las soluciones para el SO_2 diferir de aquellas para el CO , por ejemplo?



Discusión en clase

Examine cuidadosamente la figura 12.14. ¿Qué provoca las grandes diferencias en las emisiones de SO_2 a lo largo de los siete estados y el Distrito de Columbia? ¿Es la población, el consumo, la demografía (edad, ingreso, educación), la presencia (y el uso) de recursos cercanos, la ubicación de sectores industriales específicos, la ubicación de áreas urbanas o algo más?

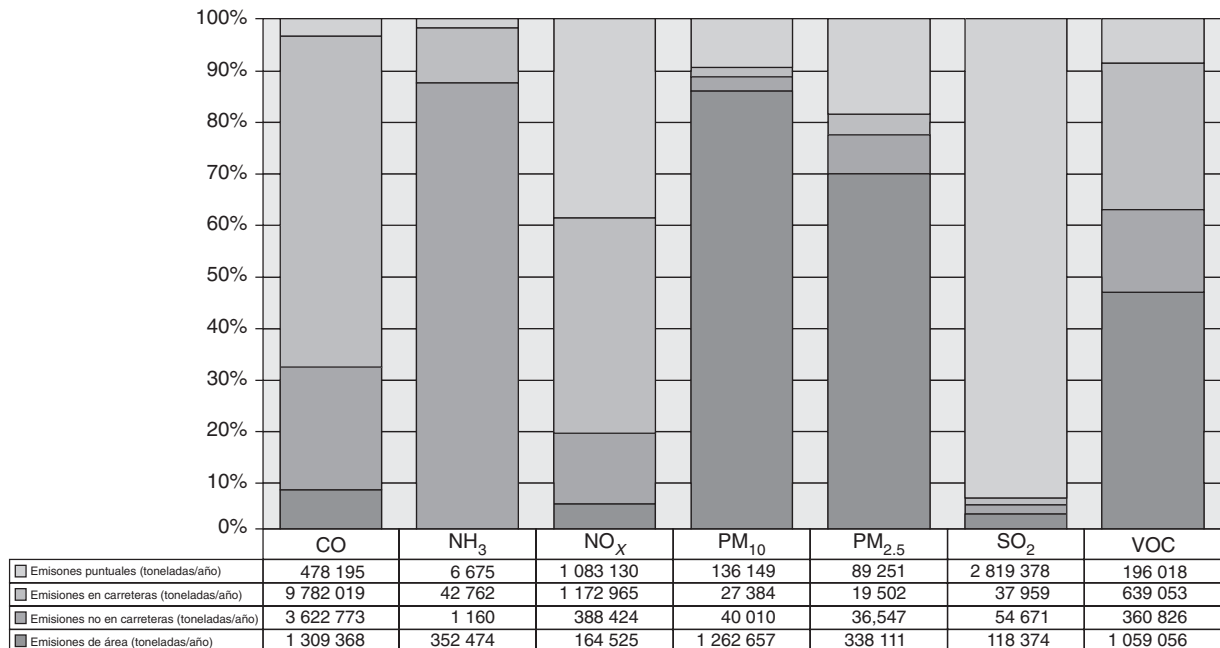


Figura 12.13 Emisiones anuales estacionarias (puntuales, de área) y móviles (en carretera, no en carretera) para cinco indicadores de contaminación y amonio (NH₃) en el Atlántico Central de Estados Unidos, 2002

Datos de MARAMA (2005)

Recuadro / 12.2 (continuación)

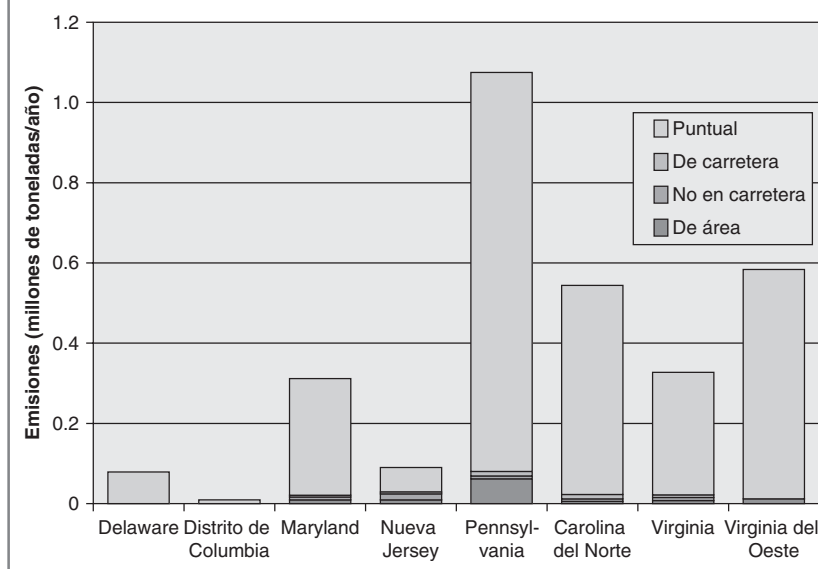


Figura 12.14 Emisiones anuales de dióxido de azufre en el Atlántico Central de Estados Unidos, 2002

Datos de MARAMA (2005).

12.5.2 CÁLCULO DE EMISIONES

Se utilizan cuatro métodos para cuantificar la magnitud de las emisiones de contaminantes de aire: 1) medición directa, 2) el enfoque de balance de masa, 3) modelado de proceso y, 4) modelado por factor de emisión. La figura 12.15 muestra las interrelaciones para el cálculo de las emisiones con estos cuatro métodos. Por ejemplo, mientras que el modelado por factor de emisión tiene su lugar como una herramienta de ingeniería, la confiabilidad de la información producida con esta técnica es de la menor calidad comparada con las otras técnicas de cálculo.

MEDICIÓN DIRECTA La **medición directa** de emisiones posee diversos retos únicos. El muestreo ocurre en la corriente de aire de descarga de la pila. Además de ser un lugar difícil para obtener dichas muestras, el medioambiente en estas corrientes de aire puede ser extremo con respecto a la temperatura, humedad y velocidad de descarga. Esto requiere equipo especializado y caro. Los sensores en dicho equipo son específicos para la instalación de la fuente y los contaminantes emitidos.

Típicamente, el equipo de monitoreo de emisión está integrado en las operaciones de la instalación, con los sensores permanentemente montados en la pila. Tal arreglo permite el monitoreo continuo de emisiones (CEM). Los sistemas CEM son requeridos para algunas fuentes, incluyendo los incineradores de desperdicios. Otras instalaciones pueden instalar sistemas CEM para facilitar la adquisición de datos, por ejemplo, de pilas extremadamente altas en plantas generadoras a base de carbón. En donde existen condiciones seguras, se pueden utilizar muestrarios de pila móviles. Estos dispositivos, operados manualmente, pueden ser llevados hasta la cima de una pila. Una línea de muestreo de aire es extendida

Contaminación del aire y los niños

<http://www.who.int/ceh/risks/cehair/en/>

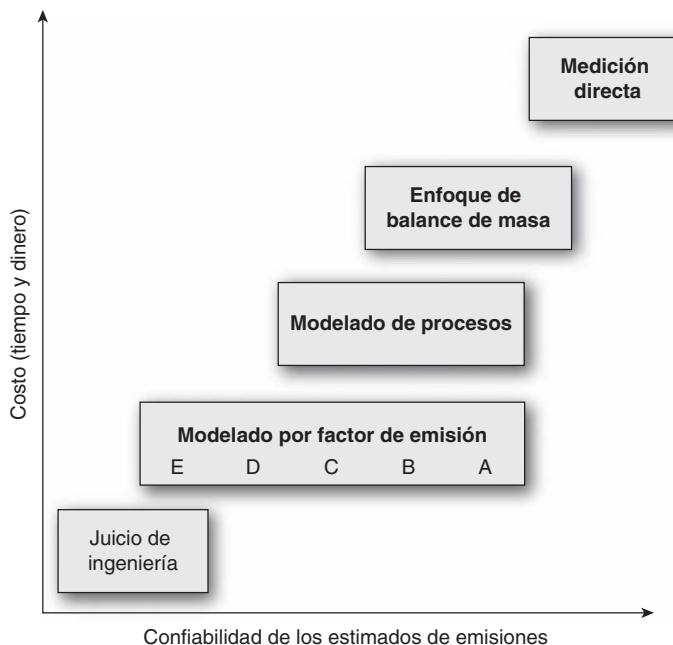


Figura 12.15 Interrelaciones relativas del cálculo de emisiones del modelado por factor de emisión, modelado por proceso, mediciones de balance de masa y monitoreo continuo de emisiones En general, una mayor confiabilidad en los cálculos de emisiones requiere más tiempo y dinero. El método más fácil, y menos confiable, sería el mejor juicio de un ingeniero.

hacia la corriente de aire de la emisión, y las emisiones son medidas con un detector portátil.

ENFOQUE DE BALANCE DE MASA El enfoque del balance de masa se puede utilizar para determinar indirectamente la tasa de emisión de algunas fuentes. En su forma más básica, esta medición indirecta es una herramienta de contabilización simple pero útil para el rastreo de contaminantes. También puede ser la manera más fácil para identificar la existencia de emisiones fugitivas o accidentales.

ejemplo/12.3 Enfoque de balance de masa aplicado a la medición indirecta de las emisiones del aire

Un tanque de almacenamiento de benceno tiene una capacidad de 500 000 kg. La masa de benceno abastecida de una planta química es de 10 000 kg/día, y la masa bombeada hacia los vehículos de transporte es de 9 980 kg/día.

Se sospecha que las pérdidas accidentales vienen de sellos de mala calidad en el tanque pero no se pueden medir fácilmente. Utilice un balance de masa para evaluar las emisiones accidentales promedio diarias (la masa exterior vía emisiones accidentales de aire) en unidades de kg/día.

ejemplo/12.3 continuación

solución

El balance de masa en el benceno está escrito (en palabras y símbolos) como sigue:

$$\left[\begin{array}{l} \text{tasa de cambio en la} \\ \text{masa de benceno} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{masa de benceno entrante en el} \\ \text{tanque por unidad de tiempo} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{masa de benceno saliente del} \\ \text{tanque por unidad de tiempo} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{tasa de decaimiento} \\ \text{del benceno} \end{array} \right]$$

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{\text{entrante}} - \dot{m}_{\text{saliente}} \pm \dot{m}_{\text{rxn}}$$

Para resolver este problema se hacen dos suposiciones: Primero, la capacidad del tanque no cambia con el tiempo, así es que tiene un estado estable (por lo tanto, $dm/dt = 0$). Segundo, el benceno no reacciona dentro del tanque (por lo tanto, $\dot{m}_{\text{rxn}} = 0$).

La tasa total de masa es de la planta química (y fue dado). Por lo tanto:

$$\dot{m}_{\text{entrante}} = 10\,000 \text{ kg de benceno/día}$$

La tasa total de masa fuera del tanque es de la carga de benceno en los vehículos de transporte (que fue dada) más las emisiones accidentales que se están determinando:

$$\dot{m}_{\text{saliente}} = \dot{m}_{\text{transporte}} + \dot{m}_{\text{emisiones}} = 9\,980 \text{ kg/día} + \dot{m}_{\text{emisiones}}$$

Al combinar todo se sabe que las suposiciones resultan en la siguiente expresión, la cual es el balance de masa original:

$$0 = 10\,000 - (9\,980 + \dot{m}_{\text{emisiones}}) \pm 0$$

Resuelva las emisiones accidentales:

$$\dot{m}_{\text{emisiones}} = 20 \text{ kg de benceno/día}$$

Por lo tanto, 20 kg/día (de los 10 000 kg/día abastecidos al tanque cada día) se pierden. Este valor de 20 kg/día fue obtenido de un método indirecto de la determinación de las emisiones de aire fugitivas de benceno del tanque. Esto representa 0.2% del abastecimiento de benceno que se pierde diariamente a emisiones accidentales, un costo que se añadirá.

MODELADO DE PROCESO Los **modelados de proceso** intentan describir las emisiones como funciones matemáticas o información de proceso relevante. En general, los modelados de proceso tratan de incorporar la física y la química de un proceso que crea los contaminantes específicos. La producción típica son tasas de emisión de contaminantes específicos. Mientras que algunos modelados de proceso están públicamente disponibles, la mayoría son creados dentro de casa por procesos de los dueños o investigadores y por lo tanto son propietarios.

Un ejemplo de un modelado de proceso comúnmente utilizado es el **MOBILE6** de la EPA (EPA, 2003). El **MOBILE6** calcula los factores de emisión (vea la siguiente sección) para 28 tipos de vehículos en distintas condiciones de operación. Los factores de emisión dependen de dichas condiciones de operación como la temperatura ambiente, la velocidad de viaje del vehículo, el modo de operación del vehículo, volatilidad del combustible y tasas de millaje entre muchos otros. Estas variantes están especificadas por el usuario del modelo. El modelado puede calcular las emisiones para hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos nitrosos, material particulado arrojado, material particulado del uso de llantas, material particulado del uso de frenos, dióxido de azufre, amonio, seis contaminantes peligrosos y dióxido de carbono para vehículos a gasolina y vehículos a diesel en movimiento incluyendo carros, camiones, autobuses y motocicletas. También existen opciones para vehículos especializados como los vehículos de gas natural o eléctricos.

El **MOBILE6** también tiene la capacidad de calcular otras emisiones, por ejemplo, emisiones accidentales del tanque de combustible generadas por la elevación de la temperatura de un auto bajo el sol, de la recarga de combustible, o de las emisiones que suceden al final de un viaje, debido al calentamiento de las líneas de combustible. La salida del **MOBILE6** es los factores de emisión en gramos o miligramos de contaminantes por vehículo por milla viajada (por ejemplo, g/mi vehículo). Con el conocimiento de la flota de vehículos en una región (por ejemplo, una ciudad), los patrones de conducción y los factores de emisión generados por **MOBILE6**, se puede crear un estimado de las emisiones vehiculares totales, tal vez para el ingreso a los modelos de calidad del aire.

MODELADO POR FACTOR DE EMISIÓN El modelado por factor de emisión se relaciona con la contaminación del aire liberada por una actividad de fuente hacia la magnitud de esa actividad. La proporcionalidad entre las emisiones y la actividad se llama **factor de emisión**. Los factores de emisión son los mejores estimados de los valores más parecidos basados en las revisiones de literatura de mediciones de procesos de emisión de calidad aceptable. Estos factores están expresados como la masa de contaminantes emitidas por peso de unidad, volumen, distancia o duración de la actividad de fuente. Entonces estas mediciones se utilizan para crear los factores de emisión, los cuales pueden ser implementados en los modelados por factor de emisión para predecir las emisiones parecidas de una nueva actividad de fuente.

En la mayoría de los casos, los factores de emisión se asumen generalmente como representativos de los promedios de largo plazo para las emisiones de instalaciones en la categoría de fuente. Como se sugirió por esta metodología, los factores de emisión son específicos para cada actividad de fuente. La fórmula 12.3 muestra el modelo por factor de emisión general:

$$E = A \times EF \times (1 - \eta) \quad (12.3)$$

en donde E es la emisión de contaminantes (masa por tiempo), A es la tasa de actividad (eventos de proceso por tiempo), EF es el factor de emisión (masa por evento de proceso) y η es la eficiencia de control de emisiones (1 es control total de emisiones y 0 es ningún control de emisiones).

Los factores de emisión están compilados y disponibles para su uso en un documento de EPA referido como AP-42 (EPA, 1995). El AP-42 proporciona factores de emisión para más de 250 actividades de fuente en 15 grupos de fuentes, amparando un amplio rango de procesos de ingeniería, actividades

humanas y hasta unos cuantos procesos naturales. Debido a su naturaleza derivada de literatura, los factores de emisión tienen una tasa para proporcionar alguna indicación de la calidad y robustez del factor para calcular las emisiones promedio de una fuente. La tasa de factor va de A (excelente) a E (pobre). En general, los factores determinados para más observaciones y metodologías de prueba aprobadas reciben los más altos rangos.

Mientras que existen muchos factores de emisión para las fuentes comunes industriales, de comunidad y naturales, no existen factores para las fuentes de contaminantes de aire interior o para las actividades basadas en tecnologías emergentes.

ejemplo/12.4 Utilización de un modelo por factor de emisión para calcular las emisiones de monóxido de carbono de la combustión de petróleo

Un calentador industrial quema 120 000 L de petróleo por día. Calcule las emisiones de monóxido de carbono de este calentador (kg/día), asumiendo que no se utilizan dispositivos de control de emisiones.

solución

El capítulo 1, sección 3, de AP-42 habla de la combustión de combustibles de petróleo. El factor de emisión, EF, para emisiones CO de calentadores industriales que queman petróleo destilado es reportado como 0.6 kg CO por 1 000 L de petróleo quemado. Este factor de emisión tiene un rango A (excelente). La emisión de CO se determina entonces con la ecuación 12.3:

$$E = A \times EF \times (1 - \eta)$$

en donde A (el aceite quemado) = 120 000 L/día, $EF = 0.6$ kg CO por 1 000 L de petróleo y $\eta = 0$.

Resuelva para E :

$$\begin{aligned} E &= (120\,000 \text{ L de aceite/día}) \times (0.6 \text{ kg CO/1 000 L de aceite}) \times (1 - 0) \\ &= 72 \text{ kg CO/día} \end{aligned}$$

Debido al alto rango de factor de emisión (A para excelente), este estimado de emisiones debería ser razonable para un promedio de largo plazo.

ejemplo/12.5 Utilización de un modelo por factor de emisión para calcular las emisiones de materias de partículas de un acervo de carbón

El carbón recién procesado es administrado diariamente a una planta de energía por carbón, movido hacia un transportador y almacenado en pilas. El carbón tiene un contenido promedio de humedad de 4.5%. La velocidad promedio del viento en el patio de almacenamiento es de 3 m/s. ¿Cuál es la emisión de PM_{10} asociada con una administración de 100 000 kg de carbón bajo estas condiciones? Expresé su respuesta en g/día.

ejemplo/12.5 Continuación

solución

El capítulo 13, sección 2.4 sobre AP-42 lidia con el manejo de agregados y pilas de almacenamiento. El factor de emisión incluye variables de proceso y para las pilas de almacenamiento se da como

$$EF = 0.0016 k \frac{\left(\frac{U}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1.4}} \text{ kg de partículas por mg de material transfe}$$

en donde EF es el factor de emisión, k es un multiplicador de tamaño de partículas, U es la velocidad del viento de la media (m/s) y M es el contenido de humedad de material (%).

El factor de emisión tiene un rango de A tanto como la humedad del material esté dentro del rango aceptable provisto para el carbón en esta sección de AP-42 (ese rango es de 2.7% a 7.4%). Como también se dijo en esta sección de AP-42, $k = 0.35$ para PM_{10} . Recuerde que $U = 3$ m/s y $M = 4.5\%$. Resuelva para EF:

$$EF = (0.0016)(0.35) \frac{\left(\frac{3.0}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{4.5}{2}\right)^{1.4}} = 2.7 \times 10^{-4} \text{ kg } PM_{10}/\text{Mg de carbón}$$

Utilice la ecuación 12.3 para calcular la emisión de PM_{10} :

$$= A \times EF \times (1 - \eta)$$

La actividad, A , es la administración de carbón: 100 mg/día (1 000 kg = 1 mg). En esta situación no hay ningún control, así es que η es 0. Sustituya estos valores para resolver para la emisión de PM_{10} para la pila de carbón bajo estas condiciones:

$$\begin{aligned} E &= (100 \text{ mg carbón/día}) \times (2.7 \times 10^{-4} \text{ kg } PM_{10}/\text{mg de carbón}) \times (1 - 0) \\ &= 2.7 \times 10^{-2} \text{ kg } PM_{10}/\text{día} = 27 \text{ g } PM_{10}/\text{día} \end{aligned}$$

La tasa A (excelente) indica que éste sería un estimado de promedio de emisión razonable.

La cotización de la congestión reduce el tráfico en los corredores urbanos

<http://www.edf.org/page.cfm?tag|DG241/>

12.6 Control de emisiones del aire

Históricamente, la contaminación del aire fue descargada hacia una pila alta para tomar ventaja de los procesos de transporte de dilución y regionales. Hoy en día, las pilas aún se usan, pero solo como una parte de una solución comprensiva.

La tabla 12.9 revisa cinco opciones para controlar la contaminación del aire: prevención, soluciones regulatorias, soluciones basadas en el mercado, soluciones voluntarias y tecnologías de control de emisión. El recuadro 12.3

Tabla / 12.9

Opciones para controlar la contaminación del aire

Solución	Descripción
Prevención	La prevención de contaminación, la química verde y la ingeniería verde pueden utilizarse para reducir o eliminar las emisiones de aire y los impactos adversos asociados.
Regulatoria	<p>La fundación de los reglamentos de la calidad del aire de Estados Unidos se encuentra en la Ley de aire limpio (pasada en 1963 y enmendada numerosas veces). Los gobiernos estatales son responsables de implementar reglamentos federales dentro de sus estados (como con los reglamentos relacionados con el agua potable y el agua residual).</p> <p>Los <i>permisos</i> amparan qué contaminantes pueden ser liberados, sus emisiones permitidas, los enfoques de control a ser utilizados, requerimientos de monitoreo y cuotas de permisos. Las aplicaciones de los permisos y los permisos resultantes están disponibles para su revisión pública.</p> <p>Los ambientes interiores no tienen la misma clase de reglamentos de calidad de aire como está previsto en la Ley de aire limpio. En su lugar, OSHA está encargada de proteger a los trabajadores al promover los lineamientos de seguridad específicos de la industria y al requerir a la industria el cumplir con los PEL.</p>
Reducciones de emisiones basadas	<p>Las Enmiendas a la ley de aire limpio (1990) introdujeron el concepto de las soluciones basadas en el mercado. Un mercado nacional de tope-y-comercio fue establecido subsecuentemente para el dióxido de azufre, y se estableció un mercado de NO_x para los estados del este en 2003. Mientras actualmente existe un mercado de dióxido de carbono en la Unión Europea, a la fecha sólo existen propuestas congresistas para la creación de un mercado similar estadounidense para el dióxido de carbono y otros gases de invernadero.</p> <p>Las soluciones basadas en el mercado trabajan estableciendo una emisión permisible total o tope. Un tope razonable es calculado al evaluar los impactos a la salud o ambientales en diversas concentraciones ambientales, junto con los modelos de calidad de aire que predicen las concentraciones ambientales de varios esquemas de emisión. El tope es entonces progresivamente reducido conforme pasa el tiempo (generalmente décadas). Los negocios determinan la mejor manera cada año para complementar estos totales reducidos de emisiones mediante mejoras tecnológicas al proceso que genera la contaminación, tecnologías de control de emisiones, y compras de créditos de emisiones en el mercado.</p> <p>Las instalaciones que generan emisiones más bajas de las permitidas pueden vender estos permisos de emisión no utilizados en el mercado, aunque también las pueden guardar para después.</p> <p>Las instalaciones que producen emisiones mayores a las permitidas pueden comprar los créditos de emisiones de los vendedores para que les cuenten para su excedente.</p>
Reducciones de emisiones voluntarias	<p>Las reducciones de emisiones voluntarias son frecuentemente esfuerzos rurales logrados por individuos en comunidades y corporaciones. Tales acciones son también buenas para lograr que el público se involucre en la mejora de la calidad del aire. De hecho, muchos problemas de la calidad del aire urbano tienen emisiones significativas de las actividades públicas como el manejo de un vehículo motorizado.</p> <p>En adición a hacer los cambios conductuales que reducen las emisiones de contaminantes, las Enmiendas a la ley de aire limpio crearon otras maneras para que el público participe en la protección del recurso del aire. El público es animado a asistir a audiencias públicas sobre permisos. El público puede demandar al gobierno o al dueño de la fuente de emisiones para tomar acciones como se dicta en los reglamentos aplicables. El público también puede solicitar acciones de la agencia estatal regulatoria o de la EPA en contra de las fuentes sospechosas de violar permisos.</p> <p>Dos enfoques comunes que los negocios utilizan para generar reducciones de emisiones voluntarias incluyen: 1) <i>programas de prevención o minimización de contaminación</i> y 2) <i>programas de incentivos al empleado</i> que crean un sistema de bonos de reconocimiento o financieros para estimular las soluciones innovadoras.</p>
Control de emisiones	Las tecnologías de control de emisiones están agrupadas por su capacidad para controlar las emisiones de contaminantes del aire gaseoso o de partículas. Las tecnologías son específicas para un contaminante. Por lo tanto, el entendimiento de la composición de la corriente de aire es importante para estrechar la lista de las tecnologías candidatas (vea la tabla 12.10 para revisión).

Recuadro / 12.3 El mercado para comercializar emisiones de SO₂

El Programa de Lluvia Ácida creado por las Enmiendas a la ley de aire limpio de 1990 instituyó el primer programa de comercialización de emisiones en Estados Unidos para el dióxido de azufre (SO₂). Este mercado también asistirá el cumplimiento de la Regla Interestatal del Aire Limpio para reducir el material particulado fino. Las concesiones de SO₂ (1 concesión = 1 tonelada de emisiones) se pueden vender o comprar en el mercado.

El mercado de SO₂ ha sido efectivo al crear un enfoque flexible para reducir las emisiones totales. El mercado también tiene volatilidad en los precios de concesiones debido a una variedad de factores, incluyendo los cambios en el precio del gas natural y el carbón, la demanda de electricidad y los cambios regulatorios (vea la figura 12.16). Por ejemplo, los precios emergieron más de 80% entre octubre (\$900 dólares) y diciembre de 2005 (\$1 600 dólares), luego volvieron a \$900 dólares sólo dos meses después. Estos impactos son más fuertemente experimentados en los mercados que tienen un bajo volumen como para las emisiones de SO₂ (EPA, 2006).

En 1995, el primer año del mercado de SO₂, las emisiones se redujeron 24% en comparación con los niveles de 1990. Entre 1995 y 2005, las emisiones de SO₂ se redujeron otro

14% a pesar del incremento de 24% en la generación de energía. Como una toma instantánea de actividad

de comercialización, el análisis de la actividad promedio en el periodo 2000-2002 revela que 335 instalaciones redujeron sus emisiones (en 6.3 millones de toneladas), mientras que 282 incrementaron sus emisiones (en 1.2 millones de toneladas) con relación a los valores de 1990. Esta es una reducción neta de 5.1 millones de toneladas (alrededor de 32% menos que las emisiones totales de 1990) (EPA, 2006).

Los mercados de emisiones se ejecutan junto con muchos otros mercados de activos, para que cualquier individuo pueda comprar concesiones. Las concesiones pueden comprarse directamente de una empresa (o individuo) que las tenga, a través de la subasta anual de EPA, o a través de un agente de activos. Algunos grupos sin fines lucrativos compran emisiones con el propósito de sacarlas del mercado, reduciendo así las emisiones disponibles en la industria y mejorando la calidad del aire en el proceso. Aún su sociedad profesional de estudiantes podría comprar emisiones.

Programas regulatorios basados en el mercado

<http://www.epa.gov/airmarkets/>

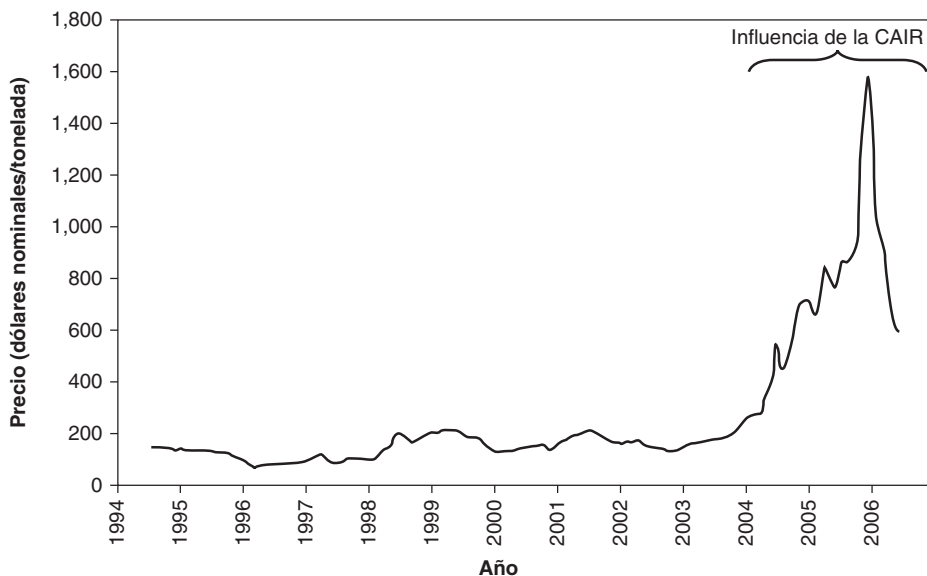


Figura 12.16 Historia de precios de las concesiones de dióxido de azufre Advierta la influencia de la Regla Interestatal de Aire Limpio (CAIR), la cual ayuda a topar permanentemente las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y óxidos nitrosos (NO_x) a lo largo de 28 estados del este y el Distrito de Columbia.

Tabla / 12.10

Tecnologías de control de emisiones de contaminantes de aire Las comparaciones de costo detalladas se pueden hacer con recursos como el *Manual de Control de Costos de la Contaminación del Aire* de la EPA (EPA, 2002).

Tecnología	Tipo de contaminante	Principio de operación	Contaminantes objetivos comunes
Oxidante térmico	Gaseoso	Oxidación de contaminantes a través de la combustión a altas temperaturas	VOC, CO
Lavador por absorción de lecho empacado	Gaseoso	Transferencia de contaminantes en líquido absorbente	NH ₃ , Cl ₂ , SO ₂ , HCl
Torre de absorción	Gaseoso	Transferencia de contaminantes en sólido absorbente	VOCs, SO ₂
Biofiltro	Gaseoso	Metabolismo de contaminantes por microorganismos	Olores, VOC
Ciclón	En partículas	Eliminación de contaminantes por fuerza centrífuga	PM > 10 μm
Lavador Venturi	En partículas	Eliminación de contaminantes por impacto en las gotas de agua	10 μm > PM > 5 μm
Colector de bolsa filtrante	En partículas	Filtración de contaminantes mediante bolsas de tela	PM > 1 μm
Precipitador Electroestático	En partículas	Atracción de partículas cargadas a placas de recolección	PM < 1 μm

proporciona un ejemplo de una solución basada en el mercado. La tabla 12.10 proporciona información sobre ocho tecnologías de control de emisión de gaseosos y de partículas.

Las reducciones de emisión voluntarias se citan como un método para lograr que el público se involucre en la mejora de la calidad del aire. Tal vez la mejor manera de tener un público involucrado es la de hacer que la información sobre la calidad del aire esté fácilmente disponible. Las bases de datos estatales y federales disponibles en la internet dan al público acceso a una vasta secuencia de datos sobre la calidad del aire. La tabla 12.11 describe tres recursos en línea capacitando a cualquiera para aprender acerca de las emisiones y la calidad del aire en casi cualquier región de Estados Unidos. Estas fuentes se desarrollan en respuesta a los requerimientos de medición regulatorios. De hecho, casi 4 000 sitios en la red de monitoreo de Estados Unidos miden continuamente la calidad del aire ambiental. Adicionalmente, las emisiones de indicadores de contaminación del aire y contaminantes peligrosos de instalaciones de fuentes principales son requeridos en el proceso de permiso. Estos datos son recolectados por las agencias regulatorias estatales y reportados anualmente a la EPA, lo cual lo hace públicamente disponible a través de estos recursos en línea, reportes y otros medios.

Para mantener al público informado sobre la calidad del aire, la EPA también requiere la publicación diaria de una medición total de la calidad del aire. Este **índice de calidad del aire (AQI)** es frecuentemente reportado por los periódicos, la televisión, la radio y las salidas de internet en áreas

¿Cuál es el índice de la calidad del aire en donde vive?

<http://www.airnow.gov/>

Tabla / 12.11

Recursos públicamente disponibles que proporcionan información sobre la calidad del aire

Recurso	Desarrollador	Sitio web	Datos
AirNow	EPA	www.airnow.gov	Condiciones de la calidad del aire actuales y previstas para la mayoría de las ciudades y algunas áreas rurales, expresado en el índice de la calidad el aire
AirData	EPA	www.epa.gov/air/data/	Emisiones históricas de contaminantes peligrosos e índices de contaminación por condado a nivel nacional
Scorecard	Defensa Ambiental	www.scorecard.org	Emisiones históricas de contaminantes peligrosos e índices de contaminación por instalaciones individuales a través de Estados Unidos

metropolitanas con más de 350 000 personas. El AQI fue desarrollado para comunicar más fácilmente la calidad del aire, utilizando un marcador de 0 a 500 con base en las mediciones diarias de los índices de contaminación del aire a excepción del plomo. La tabla 12.12 muestra cómo calcular el AQI para los contaminantes específicos y también proporciona información sobre cómo interpretar el AQI.

Cuando el AQI es más grande de 100, uno o más de los índices de contaminación ha excedido su estándar de calidad de aire ambiental, y las

Tabla / 12.12

Tabla de cálculo de índice de calidad del aire Las concentraciones diarias para cada contaminante en un sitio de monitoreo se usan para interpolar un AQI para ese contaminante de esta tabla. El AQI reportado es el más alto de los contaminantes individuales AQI.

Valor AQI	Nivel de preocupación de salud correspondiente (rango de AQI)	O ₃ (8 h) (ppb _v)	O ₃ (1 h) (ppb _v)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	NO ₂ (ppm _v)	SO ₂ (ppb _v)	CO (ppm _v)
0	Bueno (0–50)	0	—	0	0	—	0	0
50	Moderado (51–100)	64	—	15.4	54	—	34	4.4
100	Moderado (51–100)	84	125	40.4	154	—	144	9.4
150	Insalubre para grupos sensibles (101–150)	104	165	95.4	204	0.32	224	12.4
200	Insalubre (151–200)	124	204	150.4	254	0.65	304	15.4
300	Muy insalubre (201–300)	374	404	250.4	424	1.24	604	30.4
500	Peligroso (301–500)	—	604	500.4	604	2.04	1 004	50.4

autoridades declararán un Día de Acción. Los Días de Acciones se supone que implementen dos tipos de acciones: 1) medidas protectoras que los individuos afectados deberían tomar (por ejemplo, quedarse en interiores y reducir ejercicios en el exterior) y, 2) mediciones de reducción de emisiones que el público puede (o debe) tomar (por ejemplo, utilizando tránsito masivo, no utilizar equipos pequeños de motor altamente contaminantes como las podadoras, y reducir el consumo de electricidad).

Mantener al público informado puede ser una manera efectiva para reducir los problemas potenciales de salud resultantes de una mala calidad del aire. También compromete a las personas con la mejora de la calidad del aire a través de decisiones que reducen las emisiones. Por lo menos, un público atento puede reforzar la voluntad política para activar reglamentos protectores.



Discusión en clase

La Suprema Corte reglamentó en abril de 2007 que la Ley de aire limpio da a la EPA la autoridad de regular las emisiones de CO_2 y otros gases de invernadero de los coches. ¿Qué barreras políticas a nivel estatal y federal pueden causar incremento o lentitud en la implementación de acción regulatoria sobre este tema? ¿Cómo sobrepasaría las barreras si usted trabajara en el área de la política pública?

ejemplo/12.6 Cálculo del índice de calidad del aire (AQI)

El sitio de monitoreo de una ciudad reporta las siguientes concentraciones de contaminantes del aire. Utilice los datos proporcionados en las dos primeras columnas para determinar el índice de calidad del aire.

Contaminante	Concentración medida	AQI resultante
O_3 , promedio de 8 h	80 ppb _v	89
O_3 , promedio de 1 h	142 ppb _v	122
$\text{PM}_{2.5}$	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	79
PM_{10}	93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	69
NO_2	0.5 ppm _v	—
SO_2	109 ppb _v	84
CO	5.6 ppm _v	62

solución

El AQI para cada medida de contaminante se determina utilizando la tabla 12.12 y la interpolación. (Una calculadora en línea está disponible en el sitio web del gobierno federal de AirNow. Busque “calculadora AQI”, o vaya directamente a http://airnow.gov/index.cfm?action=aqi.conc_aqi_calc) Los valores resultantes de AQI se proporcionan en la tercera columna de la tabla precedente.

El AQI más alto de todos los contaminantes es el de la medición de 1 h de ozono. Por lo tanto, el AQI de la ciudad sería reportado a 122. Debido a que este valor es mayor a 100, uno o más de los indicadores de contaminación ha excedido su estándar de calidad de aire ambiental, y las autoridades declararían un Día de Acción. Este AQI sugiere que la calidad del aire está a un nivel que no es saludable para grupos sensibles. Los medios entonces emitirían noticias para que los niños, los mayores, y los individuos con enfermedades respiratorias limitaran sus actividades en el exterior.